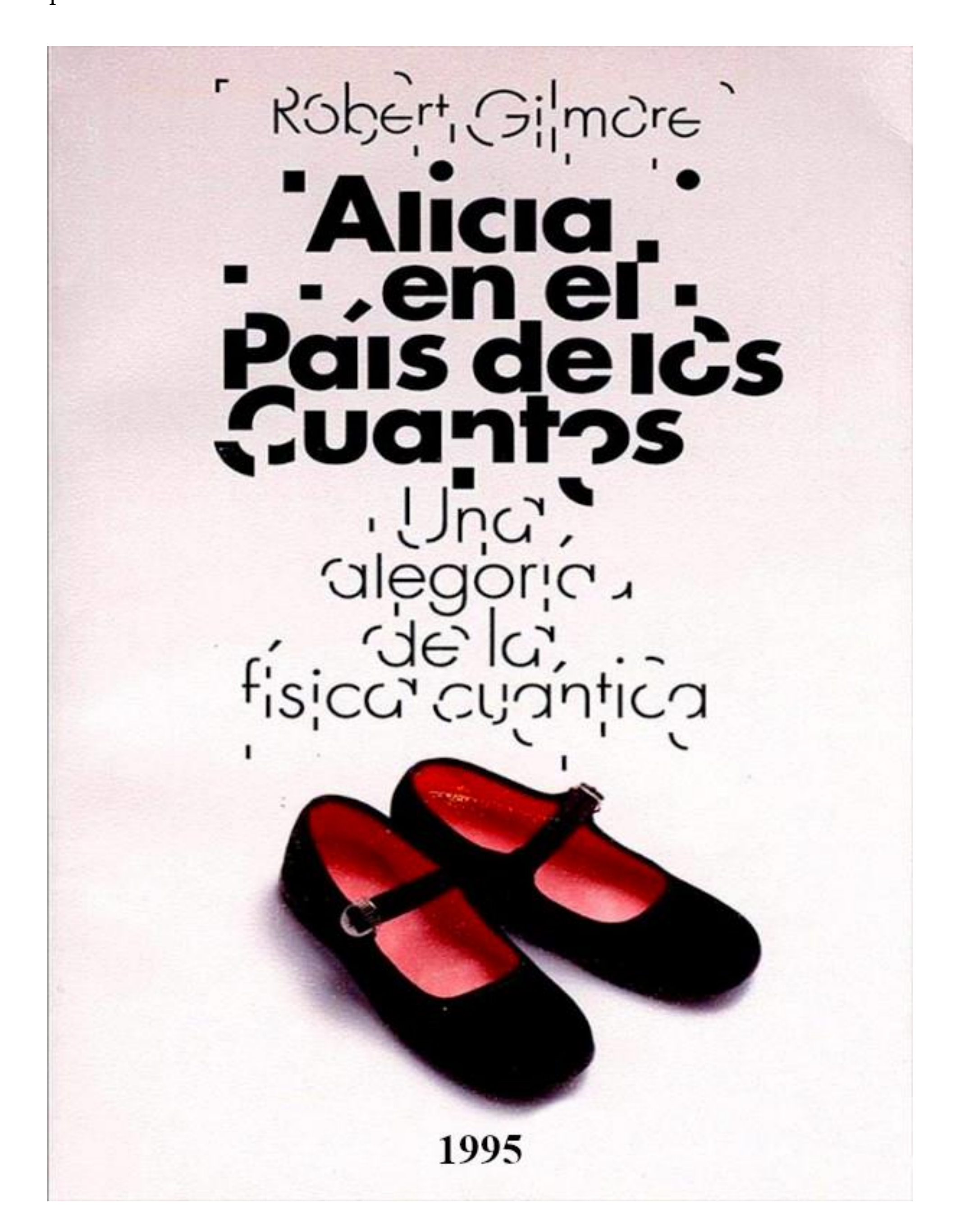

Robert Gilmore
Alicia en el País de los Cuantos
Una alegoría de la física cuántica
1995

Reseña

Aunque desde principios del siglo XX la mecánica cuántica haya desbancado por completo a las tradicionales teorías de la física clásica newtoniana, el hecho de que se base en elementos que no se "ven", como son las partículas subatómicas, así como el de que discrepe muy a menudo de nuestro sentido común o de lo que perciben cotidianamente nuestros sentidos, ha sido y es causa de su desconocimiento, cuando no de cierta reserva a la hora de acercarse a ella, por parte de la mayoría de nosotros. Sirviéndose de analogías con situaciones que nos resultan más familiares, Robert Gilmore consigue exponernos en esta obra de forma más clara y accesible los rasgos esenciales del mundo cuántico (e incluso aquellos algo más costosos de aprehender), proponiéndonos un insólito viaje para el cual sólo hace falta un poco de gusto por la aventura del pensamiento o una elemental curiosidad por el mundo que nos rodea.

Índice

Prólogo

En la primera mitad del siglo XX, nuestra comprensión del universo sufrió una auténtica convulsión. Las viejas teorías de la física clásica fueron sustituidas por una nueva manera de contemplar el mundo: la mecánica cuántica. Esta teoría muestra una gran cantidad de diferencias con las ideas de la vieja mecánica newtoniana; de hecho, discrepa de muchas maneras con nuestro sentido común. Sin embargo, lo más extraño en relación con esta teoría es su extraordinario éxito al predecir el comportamiento observado de los sistemas físicos. No obstante lo carente de sentido que a veces nos pueda resultar la mecánica cuántica, ése parece ser el comportamiento que prefiere la naturaleza, y con eso es con lo que tenemos que lidiar.

Este libro es una alegoría de la física cuántica, en el sentido expresado en el diccionario: «ficción en virtud de la cual una cosa representa o simboliza otra distinta». El modo en el que se comportan las cosas en mecánica cuántica parece muy extraño con respecto a nuestra manera normal de pensar, y se hace más aceptable si establecemos analogías, aunque puedan ser inexactas, con situaciones que nos resultan más familiares. Estas analogías no pueden ser una descripción absolutamente cierta de la realidad, puesto que los procesos cuánticos son muy diferentes de nuestra experiencia cotidiana.

Una alegoría es una analogía ampliada, o una serie de analogías. En este sentido, este libro sigue más las huellas de *Pilgrims Progress*[1] o de *Los viajes de Gulliver* que de *Alicia en el País de las Maravillas*. No obstante, «Alicia» parece el modelo más adecuado cuando se examina el mundo en que vivimos.

El País de los Cuantos por el que viaja Alicia es más bien como un parque temático en el cual ella es a veces una observadora y otras se comporta como una especie de partícula con carga eléctrica variable. Y ese país nos muestra las características esenciales del *mundo cuántico*: el mundo que todos habitamos.

Gran parte del relato es pura ficción, y los personajes son imaginarios, aunque las notas del «mundo real» descritas más adelante son verdaderas. A lo largo de la narración se encontrarán muchas afirmaciones que parecen claramente absurdas y en flagrante contradicción con el sentido común. La mayor parte de ellas son verdaderas. Se dice que Niels Bohr, la figura principal entre los fundadores de la mecánica cuántica, afirmó que quien no se siente aturdido al pensar en la teoría cuántica es que no la ha comprendido.

Seriamente, sin embargo...

La descripción del mundo que proporciona la mecánica cuántica es indudablemente interesante y digna de ser resaltada, pero ¿debe esperarse que la creamos verdadera? Sorprendentemente,

[1] *El viaje del peregrino*, de John Bunyan (1628-1688). Después de *El paraíso perdido*, esta obra se considera la más representativa del puritanismo literario inglés. *(N. del T.)*

descubrimos que debemos hacerlo. Para subrayar este aserto, a lo largo de este libro se encuentran notas breves que hacen énfasis en la importancia de la mecánica cuántica en el mundo real. Las notas son como la siguiente:

> Estas notas resumen la importancia para nuestro mundo de los temas cuánticos con los que se encuentra Alicia en cada capítulo. Están pensadas para que el lector pueda pasarlas por alto al leer la narración de las aventuras de Alicia pero si se desea descubrir el significado real de estas aventuras las notas están convenientemente a mano.

Hay también notas más largas al final de algunos capítulos que amplían algunos de los puntos más enrevesados del texto y que indicamos así:



Gran parte del modo en que la mecánica cuántica describe el mundo puede considerarse absurdo a primera vista, y posiblemente también a la segunda, la tercera o la vigésima vistas. Pero esto es lo que hay. La vieja mecánica clásica de Newton y sus seguidores es incapaz de dar ninguna clase de explicación de los átomos y otros sistemas microscópicos. La mecánica cuántica, por otro lado, se corresponde perfectamente con las observaciones; los cálculos son

con frecuencia difíciles y tediosos, pero, en los casos en que se han realizado, concuerdan a la perfección con lo que realmente se ha observado.

Nunca se hará demasiado énfasis en el notable éxito práctico de la mecánica cuántica. Aunque el resultado de una medida pueda ser aleatorio e impredecible, las predicciones de la mecánica cuántica coinciden mayoritariamente con los resultados promedio (estadísticos) obtenidos a partir de muchas medidas. Cualquier observación a gran escala involucrará una gran cantidad de átomos y por consiguiente una gran cantidad de observaciones a escala atómica. El éxito de la mecánica cuántica radica también en que coincide automáticamente con los resultados de la mecánica clásica para objetos grandes. Lo recíproco no es cierto[2].

La teoría cuántica se desarrolló para explicar observaciones realizadas sobre átomos. Desde su concepción, se ha aplicado con éxito a los núcleos atómicos, a las partículas derivadas del núcleo que interactúan fuertemente y al comportamiento de los quarks que los componen. La escala de aplicación de la teoría se ha ampliado en un factor de varios centenares de millones. Los sistemas considerados han disminuido su tamaño y a la vez han aumentado su energía en este factor. Es ésta una enorme extrapolación de la teoría desde su concepción original, pero hasta nuestros días la mecánica cuántica ha resultado ser completamente capaz de tratar esos sistemas extremos.

---

[2] Es decir, la mecánica clásica no concuerda con la cuántica por lo que respecta a objetos pequeños (moléculas, átomos, etc.). *(N. del T.)*

Hasta donde se ha investigado, la aplicabilidad de la mecánica cuántica resulta universal. En grandes escalas, sus predicciones pierden su aspecto aleatorio y concuerdan con las de la mecánica clásica, la cual funciona muy bien para objetos grandes. Incluso aquellas predicciones que parecen implicar una descripción absurda del mundo están apoyadas por la evidencia experimental. De forma sorprendente, como se discute en el capítulo 4, la mecánica cuántica parecería encontrarse en la extraña tesitura de coincidir con todas las observaciones realizadas y a la vez de poner en duda el que puedan realmente hacerse observaciones de cualquier tipo. Parece ser que el mundo es más extraño de lo que imaginamos, y quizás más extraño de lo que *podamos* imaginar.

Pero ahora acompañemos a Alicia al empezar su viaje al País de los Cuantos.

Robert Gilmore

Capítulo 1
En el País de los Cuantos

Alicia se aburría. Todos sus amigos y amigas estaban de vacaciones o visitando parientes, y además llovía, de modo que estaba encerrada en casa viendo la televisión. Desde primeras horas de la tarde había estado viendo el capítulo quinto de una serie de introducción al esperanto, un programa de jardinería y una emisión de propaganda política. Alicia se aburría soberanamente.

Dirigió su mirada al libro que estaba en el suelo al lado de su silla. Era *Alicia en el País de las Maravillas*; lo había estado leyendo antes y lo había dejado caer allí al acabarlo.

«No entiendo por qué no puede haber más dibujos animados y programas más interesantes en la televisión», se preguntó distraídamente. Desearía ser como esa otra Alicia. Estaba aburrida y de pronto encontró el camino a un país repleto de criaturas interesantes y sucesos extraños. Si de alguna manera pudiera encogerme y flotar a través de la pantalla de televisión, tal vez sería capaz de encontrar todo tipo de cosas fascinantes.

Miró con frustración la pantalla, en la que en ese momento aparecía la imagen del primer ministro explicándole cómo, en general, todo estaba mucho mejor que hacía tres años, aunque no siempre lo pareciera. Cuando estaba mirando, le sorprendió ver la imagen del primer ministro deshaciéndose en una niebla de motas danzantes que parecían precipitarse hacia dentro, como haciéndole señas.

—¡Vaya! —exclamó Alicia—. ¡Creo que quieren que las siga!

Se levantó y se dirigió hacia la televisión, pero tropezó con el libro que había arrojado tan descuidadamente al suelo y se cayó de bruces.

Mientras caía hacia delante se sorprendió al ver que la pantalla crecía enormemente y que se hallaba en medio del remolino de motas y se precipitaba con ellas hacia el interior de la imagen.

«No puedo ver nada con estas manchas revoloteando a mi alrededor —pensó Alicia—. Es como estar perdida en una tormenta de nieve; ni siquiera puedo ver mis pies. Desearía ver algo. Puedo estar en cualquier parte.»

En ese momento Alicia sintió que sus pies tocaban algo sólido y se encontró de pie sobre una superficie dura y lisa. Todas las motas que remolineaban a su alrededor se desvanecían a lo lejos y se vio rodeada de unas cuantas formas imprecisas.

Miró más detenidamente a la que tenía más cerca y observó una pequeña figura que le llegaba aproximadamente a la cintura. Era enormemente difícil distinguir los detalles, pues estaba saltando todo el tiempo hacia delante y hacia atrás, moviéndose con tanta rapidez que no era nada fácil verla con claridad. La figura parecía llevar alguna clase de bastón, o posiblemente un paraguas enrollado, que apuntaba hacia arriba.

—Hola —se presentó Alicia educadamente—. Soy Alicia. ¿Puedo preguntarle quién es usted?



—Soy un electrón —dijo la figura—. Soy un electrón con el espín hacia arriba. Puedes distinguirme fácilmente de mi amigo de allí, que es un electrón con el espín hacia abajo, y que, por lo tanto, es completamente diferente de mí —y añadió para sí algo que sonaba como *vive la différence!* Hasta donde Alicia era capaz de ver, el otro electrón parecía ser igual en todo, salvo que su paraguas, o lo que fuera, apuntaba hacia el suelo. Era muy difícil asegurarlo, ya que esta figura estaba también saltando hacia delante y hacia atrás tan rápidamente como la primera.

—Por favor —dijo Alicia a su primer conocido—, ¿sería usted tan amable de estarse quieto un momento? No hay manera de poder verlo con claridad.

—Soy tan amable —dijo el electrón—, pero me temo que no hay suficiente *sitio*. No obstante, lo intentaré.

Las partículas y los niveles atómicos difieren de los objetos en gran escala. Los electrones son muy pequeños y no muestran característica distintiva alguna, pues son completamente idénticos entre sí. Tienen alguna forma de rotación, aunque no puede decirse qué es lo que rota. Una característica peculiar es que cualquier electrón gira exactamente a la misma velocidad, independientemente de la dirección en que se mida la rotación. La única diferencia es que algunos giran en un sentido y otros en el opuesto. Dependiendo de esto, los electrones se conocen como «con espín hacia arriba» o «con espín hacia abajo».

Mientras hablaba así, disminuía el ritmo de sus saltos. Pero al tiempo que se movía más despacio, empezó a expandirse lateralmente y se hizo cada vez más difuso. Entonces, aunque ya no se movía con rapidez, parecía tan borroso y desfocalizado que Alicia no podía distinguir su aspecto mejor de lo que lo había hecho capaz anteriormente.

—Es todo lo que puedo hacer —dijo jadeando—. Me temo que cuanto más lentamente me muevo, más me disperso. Así son las cosa aquí, en el País de los Cuantos: cuanto menos espacio ocupa uno, más rápidamente tiene que moverse. Es una de las reglas, y yo no puedo hacer nada al respecto. No hay bastante sitio aquí para frenar —continuó el compañero de Alicia, al tiempo que comenzaba

a saltar rápidamente de nuevo—. El andén se está llenando tanto que debo ser más compacto.

Ciertamente, el espacio en el que permanecía Alicia estaba de bote en bote, completamente abarrotado de pequeñas figuras que danzaban frenéticamente hacia adelante y hacia atrás.

«Qué seres más extraños —pensó Alicia—. No creo que sea capaz de ver claramente cómo son si no se quedan quietos durante un minuto, y no parece que haya muchas probabilidades de que lo hagan.» Como no parecía que pudiera lograr que se pararan, pasó a otro tema.

—¿Podrían decirme, por favor, en qué clase de andén estamos? —preguntó.

—En un andén de ferrocarril, por supuesto —respondió uno de los electrones alegremente (a Alicia le resultaba muy difícil decir cuál había hablado; realmente todos eran muy parecidos)—. Vamos a tomar el tren de ondas hasta la pantalla. Transbordarás allí al expreso de fotones, espero, si es que deseas ir más lejos.

El p*rincipio de incertidumbre* de Heisenberg asegura que ninguna partícula puede tener valores simultáneos bien definidos de su posición y de su velocidad. Esto quiere decir que una partícula no puede estar quieta en una posición definida, puesto que una partícula inmóvil tiene una velocidad bien definida: cero.

—¿Se refiere a la pantalla de televisión? —preguntó Alicia.

—¡Por supuesto! —exclamó uno de los electrones. Alicia podría haber jurado que no era el que había hablado antes, pero era muy difícil asegurarlo—. ¡Vamos! El tren está aquí y hemos de subir.

Alicia podía ver una serie de pequeños compartimentos alineados en el suelo del vagón. Eran muy pequeños. Algunos estaban vacíos, otros tenían un electrón en su interior y los demás tenían dos. Todos los compartimentos vacíos se llenaron enseguida —de hecho no parecía que quedara ninguno libre—, pero Alicia notó que ninguno de los compartimentos albergaba más de dos electrones. Cuando pasaban por uno de esos compartimentos, sus dos ocupantes gritaban: «¡Completo! ¡Completo!».

—¿No se podrían meter más de dos en un compartimento en vista de que el tren va tan lleno? —preguntó Alicia a su acompañante.

—¡No! Nunca más de dos electrones juntos, ésa es la regla.

—Supongo que entonces tendremos que ir en compartimentos distintos —exclamó Alicia con pena, pero el electrón la tranquilizó:

—No hay ningún problema en tu caso, ¡absolutamente ningún problema! Puedes entrar en el compartimento que desees, por supuesto.

—De verdad, no puedo entender cómo puede ser eso así —repuso Alicia—. Si un compartimento está tan lleno que usted no puede entrar en él, con toda seguridad estará igual de lleno también para mí.

—¡Nada de eso! Los compartimentos pueden albergar sólo dos electrones, así que casi todos los sitios para electrones pueden estar

ocupados, ¡pero tú no eres un electrón! No hay ninguna otra Alicia en el tren, de modo que hay un montón de sitio para Alicia en cualquiera de los compartimentos.

Por lo que Alicia podía ver, no parecía que sucediera eso, pero temía que el tren arrancara antes de que encontraran asiento, de modo que empezó a buscar un sitio vacío capaz de albergar otro electrón.

—¿Qué le parece éste? —preguntó a su camarada—. Aquí hay un compartimento con sólo un electrón dentro. ¿Puede entrar en él?

Los electrones son absolutamente idénticos y obedecen el principio de exclusión de Pauli (véase el capítulo 5), que impide que haya más de un electrón en el mismo estado (o más de dos, cuando se incluyen las dos posibles direcciones diferentes del espín).

—¡De ninguna manera! —respondió agriamente el electrón, horrorizado—. Ése es otro electrón con espín hacia arriba. No puedo alojarme en el mismo compartimento que otro electrón con espín hacia arriba. ¡Vaya una idea! Eso va en contra de mi principio.

—¿No querrá decir en contra de sus principios? —le preguntó Alicia.

—Quiero decir lo que digo: en contra de mi principio, o más bien del principio de Pauli. Este principio prohíbe que dos de nosotros hagamos exactamente lo mismo, lo que incluye estar en el mismo lugar y tener el mismo espín —respondió con enfado.

Alicia no sabía por qué se había enfadado, no obstante se apresuró a mirar a su alrededor a fin de hallar otro compartimento que a él le conviniera más. Consiguió encontrar uno en el que había un solo electrón, que era de la variedad espín hacia abajo, y su acompañante se introdujo allí con toda rapidez. Alicia se sorprendió al darse cuenta de que, aunque el pequeño compartimento parecía entonces lleno, de alguna manera había bastante sitio para acomodarse fácilmente.

Tan pronto como se habían acomodado, el tren arrancó. Durante el viaje no ocurrió nada, y el panorama no era muy interesante, de modo que Alicia se alegró cuando el tren empezó a frenar.

«Esto debe de ser la pantalla, supongo —pensó Alicia—. Me pregunto qué sucederá aquí.»

Cuando llegaron a la pantalla había un enorme murmullo por todas partes.

—¿Qué ocurre? —se preguntó Alicia en voz alta—. ¿Por qué todo el mundo parece estar tan excitado?

Sus preguntas fueron contestadas por un anuncio que parecía llegar del aire a su alrededor.

—La pantalla de fósforo está ahora siendo excitada por los electrones entrantes y pronto tendremos emisión de fotones. Permanezcan en el punto de partida del expreso fotónico.

Alicia miró a su alrededor tratando de ver la llegada del expreso, y en ese momento surgió un torrente de formas resplandecientes a lo largo del andén. Se sintió atrapada en medio de la muchedumbre y se unió a ellos mientras se agolpaban en un compartimento.

«Bueno, parece que no les preocupa el principio de Pauli ni ningún otro —pensó Alicia cuando se agolpaban a su alrededor—. A éstos les importa poco estar todos en el mismo sitio. Supongo que el expreso va a partir pronto. Me pregunto dónde acabaremos —concluyó al tiempo que se apeaba—. Caramba, qué viaje tan rápido. Parece como si no hubiera transcurrido tiempo alguno.» (Alicia tenía en eso toda la razón. El viaje no duró nada en absoluto, porque efectivamente el tiempo se «congela» para cualquier cosa que viaje a la velocidad de la luz.) De nuevo se encontró rodeada de una multitud de electrones que salían precipitadamente del andén.

—¡Ven! —le gritó uno de ellos al salir—. Debemos abandonar la estación ahora, si es que vamos a alguna parte.

—Disculpe —lo tanteó Alicia—. ¿Es usted el mismo electrón con el que hablaba antes?



—Sí, lo soy —respondió el electrón a la vez que se movía rápidamente hacia la salida. Alicia fue arrastrada por la multitud de electrones desde el andén hasta la puerta principal de salida.

—Afirmo que esto es una lata —dijo Alicia—. Ahora he perdido a la única persona que conozco en este extraño lugar y no tengo a nadie que me explique lo que está pasando.

—No te preocupes, Alicia —dijo una voz a la altura de sus rodillas—. Te indicaré adónde vamos. —Era uno de los electrones.

—¿Cómo sabe usted mi nombre? —preguntó Alicia sorprendida.

—Muy fácil. Soy el mismo electrón con quien hablaste antes.

—¡No es posible! —exclamó Alicia—. Vi a ese electrón salir en una dirección diferente. ¿No era quizás ése con quien hablé antes?

—Lo era, ciertamente.

—Entonces los dos no pueden ser el mismo —dijo Alicia cargada de razón—. No pueden ser ambos el mismo, ¿no es cierto?

—¡Claro que podemos! —dijo el electrón—. Él es el mismo. Yo soy el mismo. Todos somos el mismo, ¡exactamente el mismo!

—Eso es ridículo —repuso Alicia—. Usted está junto a mí y él salió disparado hacia algún otro sitio, así que no pueden ser ambos la misma persona. Uno de los dos ha de ser diferente.

—En absoluto —exclamó excitado el electrón, saltando incluso más deprisa hacia arriba y hacia abajo—. Nosotros somos todos idénticos; no hay manera alguna de que puedas distinguirnos, de modo que ves que él es el mismo y yo también lo soy.

En ese instante, la muchedumbre de electrones que rodeaban a Alicia comenzó a gritar:

—¡Yo soy el mismo! ¡Yo también soy el mismo! ¡Soy el mismo que tú!

El tumulto era espantoso, y Alicia se tapó los oídos con las manos hasta que cesó el ruido. Cuando se restableció la calma, Alicia abrió los ojos y bajó las manos. Se dio cuenta de que no había rastro alguno de la multitud de electrones que antes la rodeaban y que salía completamente sola de la estación. Mirando a su alrededor, advirtió que se encontraba en una calle que a primera vista parecía completamente normal. Torció a la izquierda y empezó a caminar por la acera.

No había ido muy lejos cuando se topó con una figura que permanecía como desconsolada enfrente de una puerta y buscaba algo en sus bolsillos. La figura era corta y muy pálida. Era difícil distinguir bien su cara, como había ocurrido con todos los que había conocido recientemente, pero —pensó Alicia— se parecía bastante a un conejo.

—Dios mío, Dios mío, llego tarde y no encuentro mis llaves en ningún sitio. ¡Debo entrar inmediatamente! —Y a la vez que hablaba así retrocedió unos cuantos pasos y después corrió rápidamente hacia la puerta.

Iba tan deprisa que Alicia fue incapaz de verlo en ninguna posición determinada, y en cambio percibió como una cadena de sensaciones visuales posteriores que mostraban las posiciones por donde había pasado a lo largo de su camino. Éstas se extendían desde el punto de partida hasta la puerta, pero allí, en lugar de detenerse como habría esperado, continuaban *dentro* de ella, haciéndose cada vez más pequeñas, hasta que lo eran tanto que no podían verse. Apenas

había tenido Alicia tiempo de asimilar esa extraña serie de imágenes, cuando él salió rebotado con la misma rapidez, dejando de nuevo una serie de imágenes. Ahora éstas acababan bruscamente con la infortunada persona tendida de espaldas en la cuneta. Sin mostrar desánimo alguno, se levantó y corrió de nuevo hacia la puerta. Otra vez apareció la serie de imágenes posteriores, disminuyendo hacia el interior de la puerta, y de nuevo salió rebotado y acabó tendido boca arriba.

Al tiempo que Alicia corría apresuradamente hacia él, repitió esa acción varias veces, arrojándose hacia la puerta para después caer hacia atrás.

—¡Párese, párese! —gritó Alicia—. No debe hacer eso; se hará daño con seguridad.

El individuo cesó de correr y miró a Alicia.

—¡Ah!, hola, querida. Tengo que hacerlo, me temo. La puerta está cerrada y debo entrar rápidamente, así que no tengo más remedio que tratar de «tunelear» a través de la barrera.

Alicia miró hacia la puerta, que era grande y muy sólida.

—No creo que tenga muchas probabilidades de atravesarla corriendo hacia ella —dijo—. ¿Está tratando de romperla?

—¡Seguro que no! No deseo destruir mi hermosa puerta. Sólo deseo «tunelear» a través de ella. No obstante, me temo que lo que dices es cierto. La probabilidad de que consiga atravesarla no es ciertamente muy grande, pero tengo que intentarlo. —Y diciendo esto cargó de nuevo contra la puerta. Alicia lo dejó por imposible y se alejó en el instante en que salía rebotado una vez más.

Tras haber dado unos cuantos pasos, Alicia no pudo resistirse a mirar hacia atrás para ver si por casualidad el personaje había cesado en sus esfuerzos, y vio de nuevo la serie de imágenes precipitándose hacia la puerta y menguando cuando la alcanzaban. Esperó el rebote. Antes éste había ocurrido inmediatamente después, pero esta vez no se produjo. La puerta estaba allí, sólida y bastante desamparada, pero no había ningún rastro de su conocido. Después de que hubieran pasado unos segundos sin que sucediera nada, Alicia oyó un traqueteo de cerrojos y cadenas, y la puerta se abrió de par en par. Su desaparecido compañero miró hacia fuera y la saludó.

—He tenido suerte —exclamó—. La probabilidad de penetrar una barrera tan gruesa es verdaderamente muy pequeña, y he sido muy afortunado por haberla atravesado con tanta rapidez. —Cerró la puerta dando un golpazo, y eso pareció concluir el encuentro, así que Alicia siguió caminando por la calle.

Un poco después llegó a un solar vacío a un lado de la calle, donde un grupo de albañiles se agrupaban en torno a una pila de ladrillos. Alicia supuso que eran albañiles porque estaban descargando más ladrillos de una carretilla.

La teoría cuántica describe el comportamiento de las partículas en términos de distribuciones de probabilidad, y la observación de hecho de partículas individuales ocurrirá aleatoriamente en el marco de esas distribuciones. Las

probabilidades pueden referirse también a procesos prohibidos en la mecánica clásica, como la penetración de partículas a través de barreras delgadas de energía.

«Bueno, por lo menos parece que esta gente se comporta de una manera sensata», pensó para sí. Justo en ese instante surgió otro grupo de una esquina llevando algo que parecía una alfombra enrollada muy grande, y se pusieron a desenrollarla allí mismo.

Cuando estaba del todo desenrollada, Alicia pudo ver que era una especie de plano de construcción. Parecía ser un plano muy grande porque ocupaba la mayor parte del espacio disponible.

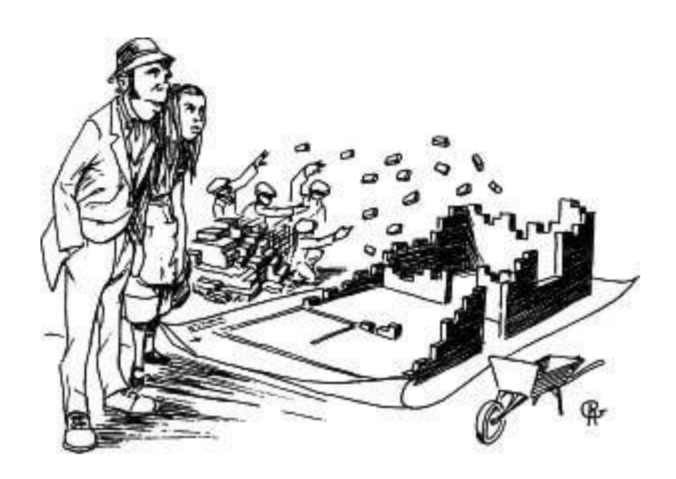
—Vaya, creo que debe de tener exactamente el mismo tamaño que el edificio que van a levantar —dijo Alicia—, ¿pero cómo se las van a arreglar para construir algo si el plano ocupa ya todo el sitio?

Los albañiles habían acabado de ubicar el plano en su sitio y se habían retirado hasta el montón de ladrillos. Todos ellos agarraron ladrillos y empezaron a arrojarlos sobre el plano, parecía que completamente al azar. Reinaba una total confusión —algunos caían en un lugar, otros en otro distinto—, y Alicia no podía extraer ningún significado de todo aquello.

—¿Qué están haciendo? —preguntó a una persona que permanecía a un lado. Parecía que no hacía nada, y ella supuso que era el capataz—. Lo único que hacen es crear montones desordenados de ladrillos. Se supone que están levantando un edificio, ¿no?

—Cierto. Así es, querida —respondió el capataz—. Bien es verdad que las fluctuaciones aleatorias son todavía lo bastante grandes para ocultar el diseño, pero, como hemos establecido la distribución de probabilidad para el resultado que necesitamos más tarde, a él llegaremos. No se preocupe.

Alicia tenía la impresión de que esa muestra de optimismo no era muy convincente, pero conservó la calma y miró la lluvia de ladrillos que seguía cayendo. Para su gran sorpresa, observó que poco a poco los ladrillos caían en algunas partes más que en otras, y pudo empezar a hacerse una idea de los trazados de las paredes y de las puertas. Contempló fascinada cómo del caos inicial empezaban a surgir las formas reconocibles de las habitaciones.



—¡Vaya, esto es sorprendente! —exclamó—. ¿Cómo se las arreglan para hacerlo?

—Bueno, ¿no te lo he dicho ya? —dijo sonriendo el capataz—. Nos viste diseñar la probabilidad antes de empezar. Allí se especifica dónde tiene que haber ladrillos y dónde no. Hemos de hacer esto antes de empezar a colocar los ladrillos, porque no podemos

predecir adónde irá cada uno de ellos cuando lo arrojamos —continuó.

—¡No veo por qué! —le interrumpió Alicia—. Estoy acostumbrada a ver ladrillos colocados en su sitio uno tras otro siguiendo líneas precisas.

—Bueno, ésa no es la manera cuántica. Aquí no podemos controlar adónde va cada ladrillo en concreto, sólo la probabilidad de que vaya a un sitio o a otro. Esto significa que cuando sólo se tienen unos pocos ladrillos, éstos pueden ir prácticamente a cualquier sitio y parece no haber ningún patrón en absoluto. Sin embargo, cuando el número se hace grande, se descubre que hay ladrillos sólo donde existe alguna probabilidad de que los haya, y aparecen más ladrillos donde la probabilidad es mayor. Cuando se trata de una gran cantidad de ladrillos, todo funciona espléndidamente, desde luego.

Alicia encontró todo esto muy peculiar, aunque el capataz hablaba con tanta convicción que parecía que podría tener alguna clase de extraño sentido. No hizo más preguntas por el momento, porque las respuestas del capataz sólo lograban confundirla cada vez más, así que le dio las gracias por la información y siguió su camino calle abajo.

Poco después llegó a una ventana en la que se mostraba un gran anuncio:

¿Se encuentra insatisfecho con su estado?

¿Le gustaría mudarse a un nivel más alto?

Le ayudaremos a hacer la transición por sólo 10 eV.
(Oferta sujeta a la limitación normal de la exclusión de Pauli)

—Todo esto tiene una apariencia muy tentadora, desde luego, pero no tengo idea de lo que quiere decir, y si le preguntara a alguien, estoy segura de que la respuesta me dejaría peor de lo que ya estoy —exclamó con desesperación—. No he comprendido realmente nada de lo que he visto hasta ahora. Desearía poder encontrar a alguien que me proporcionara una buena explicación de lo que está pasando a mi alrededor.

No se había dado cuenta de que había hablado en voz alta hasta que le respondió un viandante.

—Si deseas entender el País de los Cuantos necesitarás encontrar a alguien que te explique la mecánica cuántica. Para eso debes ir al Instituto de Mecánica —le aconsejó.

—Oh, ¿podrán ayudarme a comprender lo que está sucediendo aquí? —exclamó muy contenta Alicia—. ¿Podrán explicarme todas las cosas que he visto, como, por ejemplo, el anuncio de esa ventana, y decirme qué son esos «eV»?

—Creo que el Instituto será capaz de explicarte la mayor parte de ello —respondió su informador—, pero como los eV son unidades de energía, probablemente sería mejor que empezaras preguntando en el Banco Heisenberg, que está justo cruzando la calle.



Alicia miró hacia donde él señalaba y vio un gran edificio con una fachada muy formal, diseñada evidentemente para impresionar. Tenía un elevado pórtico con columnas de piedra y en la parte superior se había esculpido en grandes letras el nombre:

BANCO HEISENBERG

Cruzó la calle, subió el largo tramo de escalones de piedra que conducía a la imponente entrada y la atravesó.

Capítulo 2
El Banco Heisenberg

Cuando Alicia cruzó la entrada, se encontró en una gran sala con columnas y paredes de mármol. Se parecía mucho a otros bancos que había visto antes, sólo que todo más acusado por así decirlo. Había una línea de ventanillas de caja a lo largo de la gruesa pared y el amplio suelo estaba dividido mediante barreras móviles de cinta, de manera que los clientes se agrupaban en colas bien delimitadas mientras esperaban ser atendidos. Sin embargo, en aquel instante el lugar parecía estar completamente vacío de clientes. Aparte de los cajeros detrás de sus ventanillas y de un guarda jurado cerca de la puerta, Alicia no vio a nadie.

Como le habían aconsejado pedir información en el Banco, empezó a caminar decididamente hacia la distante fila de ventanillas.

—¡Espera un momento! —gritó el guardia de la puerta—. ¿Adónde crees que vas, jovencita? ¿No ves que hay una cola?

—Lo siento —contestó Alicia—, pero realmente *no puedo* ver ninguna cola. No hay nadie allí.

—Claro que hay, ¡y un montón! —replicó el guardia enérgicamente—. Parece que tenemos una verdadera invasión de «no gente» hoy, aunque normalmente nos referimos a ellos como *virtuales*. Raras veces he visto tantas partículas virtuales esperando para cobrar sus préstamos de energía.

Alicia tuvo la impresión ya familiar de que las cosas no iban a aclararse con rapidez. Echó un vistazo a las ventanillas y observó

que, aunque la habitación seguía pareciendo completamente vacía, todos los cajeros estaban muy ocupados. En éstas, vio aparecer unas figuras brillantes, una tras otra, junto a una u otra caja, que después salieron muy deprisa del Banco. En una caja vio materializarse juntas un par de figuras enfrente de una rejilla. Reconoció a una de ellas como un electrón; la otra era muy parecida, pero parecía una especie de negativo de la primera, opuesta en todo a los electrones que había visto con anterioridad.

—Ése es un positrón, un *antielectrón* —murmuró una voz en su oído. Alicia miró a su alrededor y vio a una mujer joven de aspecto serio y elegantemente vestida.

—¿Quién es usted? —le preguntó.

—Soy la Directora del Banco —respondió su interlocutora—. Soy la encargada de la distribución de los préstamos de energía a todas las partículas virtuales presentes. La mayoría son fotones, como puedes ver, pero a veces tenemos pares de partículas y antipartículas que vienen juntas a pedir un préstamo, como el par electrón-positrón al que estabas ahora mirando.

—¿Por qué necesitan un préstamo de energía? —preguntó Alicia—. ¿Y por qué no puedo verlos antes de que lo obtengan?

—Bueno, mira —contestó la Directora—, para que una partícula exista realmente, de manera que pueda ser una partícula *libre* y sea capaz de moverse y de ser observada y todo eso, ha de tener, al menos, una cierta energía mínima que llamamos su *energía de masa en reposo*. Esas pobres partículas virtuales ni siquiera tienen esa energía. La mayoría de ellas no tiene ninguna energía, así que

no existen realmente. Por fortuna para ellas, pueden obtener un *préstamo* de energía aquí, en el Banco, y esto les permite existir durante un instante.

Señaló un anuncio en la pared donde se leía:

CONDICIONES DE PRÉSTAMO

$\Delta E \, \Delta T = \hbar/2$

Se agradecería devolución puntual

—Eso se llama la relación de Heisenberg. Rige todas nuestras transacciones. La cantidad $\hbar$ se conoce como la *constante de Planck*, la constante reducida. La relación da la tasa de intercambio para nuestros préstamos de energía. La cantidad ΔE es la cantidad de energía que se presta, y ΔT es el período para el que se hace el préstamo.

—¿Quiere usted decir —repuso Alicia, tratando de entender lo que decía la Directora— que es como la tasa de intercambio entre diferentes tipos de moneda, de modo que cuanto más tiempo haya, más energía pueden tener?

—¡Oh, no! ¡Todo lo contrario! Es el *producto* de la energía y el tiempo lo que es constante, de manera que cuanto mayor sea la cantidad de energía, *menor* será el tiempo que se les permite guardarla. Si deseas entender lo que quiero decir, sólo tienes que observar las exóticas partícula y antipartícula que acaban de retirar un préstamo en la ventanilla 7.



Alicia miró hacia donde se le decía y observó algo asombroso. Enfrente de la ventanilla había un par de figuras; una era la opuesta de la otra, de manera muy parecida al electrón y positrón que había visto anteriormente. Las figuras de este par, sin embargo, eran brillantes y extravagantes, y su presencia ocupaba tanto espacio que oscurecía al cajero que estaba detrás. Alicia no pudo por menos que impresionarse ante la extravagancia de los dos, pero cuando empezaba a abrir la boca para hacer un comentario, ambos se hicieron borrosos y después se desvanecieron completamente.

La mayoría de las partículas tiene masa en reposo, y esto equivale a una gran cantidad de energía. Las partículas virtuales sin ninguna energía inicial pueden todavía existir durante un breve período «pidiendo prestada» la energía que

necesitan para su masa en reposo en forma de una fluctuación cuántica.

—Eso es una ilustración de lo que estaba diciendo —continuó pausadamente la Directora—. Esa pareja sacó una enorme cantidad de energía para sostener la gigantesca masa en reposo que necesitan para su forma de vida. Como el préstamo era tan grande, el tiempo de devolución era bastante corto, tanto que ni siquiera han podido abandonar la caja antes de tener que devolverlo. A esas partículas pesadas se las conoce en el oficio como partículas *de corto alcance*, porque no pueden llegar muy lejos antes de devolver su préstamo de energía —añadió.

—¿Es entonces la relación entre tiempo y energía igual para todas ellas? —preguntó Alicia, que tuvo la impresión de que podría haber descubierto finalmente algo concreto.

—¡Ciertamente! La constante de Planck es siempre la misma donde y cuando se aplique. Es lo que se llama una *constante universal*, lo cual significa que es siempre la misma en todas partes.

»Aquí en el Banco tratamos con la energía —prosiguió la Directora—, porque la energía funciona como si fuera dinero en el País de los Cuantos. Del mismo modo que tú cuentas tu dinero en dólares o euros, la unidad de energía usada aquí se llama *eV* (electrón-voltio). La cantidad de energía que tiene una partícula determina lo que es capaz de hacer; la rapidez con que puede ir, qué estado puede

alcanzar, cuánto podrá afectar a otros sistemas…, todo ello depende de la energía que posea.

»No todas las partículas son completamente indigentes como las que están en la cola. Muchas de ellas poseen su propia energía, y en ese caso pueden conservarla durante el tiempo que quieran. Ésas son las que has visto pululando ahí fuera. Cualquier partícula que necesite tener masa ha de tener energía para existir.

La Directora señaló otro anuncio encuadrado en la pared que decía:

La masa es energía
La energía es masa

—Si una partícula desea tener masa, debe encontrar la energía para de alguna manera mantenerla. Si tiene alguna energía sobrante, puede usarla para hacer otras partículas. No todas las partículas están preocupadas por la masa —añadió—. Existen algunas partículas informales y bohemias que no tienen en absoluto masa en reposo. No están limitadas como la mayoría de las partículas, que han de procurarse su masa, de modo que pueden usar incluso pequeñas cantidades de energía. Los fotones son un buen ejemplo. Un fotón no tiene masa en reposo, de manera que en tal estado no pesaría nada en absoluto. Pero, cuidado, no existen fotones en reposo; siempre viajan a la velocidad de la luz, pues los fotones son los constituyentes de la luz. La luz no es una corriente continua, está formada por una gran cantidad de *cuantos*, pequeños paquetes

de energía, de modo que el flujo luminoso es granular. Esos cuantos o partículas de luz se llaman *fotones*; prácticamente todo aparece en forma de cuantos de cierto tamaño. De aquí recibe la física cuántica su nombre. Mira esos fotones que salen ahora del Banco. Básicamente todos los fotones son iguales, exactamente similares entre sí del mismo modo que lo son los electrones, pero puedes darte cuenta de que muchos de esos fotones parecen muy diferentes. Eso es debido a que poseen diferentes cantidades de energía; algunos tienen muy poca energía, como esos fotones de radiofrecuencias que salen en este momento.

Alicia bajó la mirada hacia una multitud de fotones que pasaban precipitadamente junto a ella, fluyendo en torno a sus pies y encaminándose a la salida a través de la puerta. Al pasar, oyó fragmentos de música, voces dramáticas y algo acerca de «comer el jueves».

—No sabía que las ondas de radio estuvieran hechas de fotones —admitió Alicia.

—¡Oh, sí, por supuesto! Son fotones de longitud de onda muy grande, con frecuencia muy baja y energía muy pequeña. Además son muy gregarios, porque para producir algún efecto apreciable se necesita un montón de ellos a la vez. Pequeños individuos amistosos, ¿no? —dijo sonriendo la interlocutora de Alicia—. Paso ahora a los fotones visibles, a los que constituyen la luz que la gente usa para ver; éstos tienen una frecuencia más elevada y mayor energía. Uno solo de ellos puede producir un efecto bien perceptible. No obstante, los verdaderamente opulentos, los grandes gastadores,

son los fotones de rayos X y de rayos gamma. Cada uno de ellos lleva consigo una gran cantidad de energía y pueden hacer sentir su presencia a su alrededor si deciden interactuar.

—Esto es ciertamente muy interesante —dijo Alicia de una manera no del todo insincera—, pero estoy aún confusa acerca del concepto de energía. ¿Puede decirme qué *es* realmente la energía?

—Bueno —replicó la Directora con satisfacción—, es una buena pregunta, pero desgraciadamente no es fácil de responder. Ven a mi despacho y trataré de explicártelo.

La Directora condujo enérgicamente a Alicia a lo largo del suelo embaldosado de la sala principal y a través de una puerta discreta pero bastante segura situada en una esquina. Tras indicar a Alicia que se sentara en una honda y cómoda silla colocada frente a la ancha mesa de trabajo, la Directora dio la vuelta y se sentó en la silla del otro lado.

—Bien —empezó—, la energía es un poco como el dinero en tu mundo, que tampoco resulta demasiado fácil decir lo que es exactamente.

—Yo creo que sí es fácil —respondió Alicia—. Las monedas, como las que tengo en el bolsillo, o los billetes de banco son dinero.

—Eso es *metálico*, que es ciertamente una forma de dinero, pero el dinero no tiene necesariamente que estar en billetes o monedas. Puede estar en una cuenta de ahorros, por ejemplo, o en valores y acciones, o incluso invertido en un edificio. De manera muy parecida, la energía puede adoptar muchas formas, las cuales parecen muy diferentes entre sí. La forma más evidente es la *energía*

cinética —dijo la Directora, acomodándose en su silla; y su voz tomó el tono complaciente de quien está a punto de impartir una larga conferencia a un público entregado.



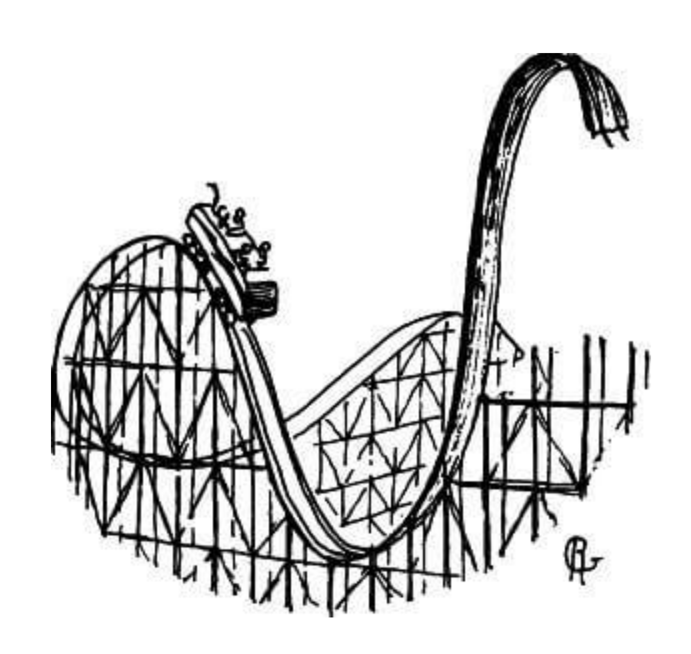
»Una partícula, o cualquier otro objeto que haga al caso, tendrá energía cinética si se está moviendo. Has de saber que "cinético" significa simplemente "en movimiento". Existen también otras formas de energía. Está la energía *potencial*, como la que posee una piedra encima de una colina y en posición de rodar hacia abajo. Puede tenerse también energía eléctrica, o energía química, que es justamente la energía potencial que poseen los electrones cuando están dentro de los átomos. Después, como ya he dicho, existe la *energía de la masa en reposo* (simplificando: energía en reposo) que deben poseer muchas partículas simplemente para existir, de modo que puedan tener alguna masa. Una forma de energía puede *convertirse* en otra, de la misma manera que tú puedes ingresar

dinero en efectivo en tu cuenta corriente. Puedo ilustrar lo que digo con un ejemplo si miras por la ventana redonda. —Inclinándose, apretó un botón en su mesa y se abrió una ventana circular en la pared enfrente de Alicia, que pudo ver a través de ella una montaña rusa de feria. Cuando estaba mirando, una vagoneta subió hasta lo alto de una “colina” y se detuvo momentáneamente allí antes de descender rápidamente por el lado opuesto—. Como puedes ver, esa vagoneta no se mueve en este momento, así que *no* posee energía cinética, pero está en lo más alto, de modo que tiene energía potencial dada su posición. Al empezar a descender hacia el “valle”, pierde altura, de modo que pierde algo de esa energía potencial, la cual se convierte en energía cinética; así que cuanto más baja, más deprisa va.

La energía se presenta de muchas formas. Puede aparecer como energía de la masa en reposo (energía en reposo) de una partícula, como la energía cinética involucrada en el movimiento de cualquier objeto, y como diversos tipos de energía potencial. Una forma de energía potencial es la energía potencial gravitatoria, la cual disminuye al caer el objeto.

Alicia podía vagamente oír los felices chillidos de excitación de los lejanos pasajeros de la vagoneta al bajar ésta con estruendo por el raíl.

—Si el raíl fuera muy liso y las ruedas se movieran sin fricción —continuó la conferenciante con calma—, la vagoneta se pararía exactamente a la misma altura.



Inclinándose, jugueteó de nuevo con algo en su mesa. Las lejanas figuras en la montaña rusa gritaron sorprendidas al ver surgir mucho más alta la siguiente colina en el raíl. Su vagoneta frenó, deteniéndose completamente antes de llegar a la cima.

—¿Cómo lo ha hecho? —exclamó sorprendida Alicia.

—Nunca subestimes la influencia de un banco —murmuró su interlocutora—. Ahora mira lo que sucede.

La vagoneta empezó a rodar descendiendo hacia atrás, acompañada por más gritos, todavía excitados pero menos alegres que anteriormente. Tomó velocidad hasta que cruzó el punto más bajo y empezó a subir por la cuesta opuesta, frenándose poco a poco. Se

detuvo justamente en el pico donde Alicia la había visto al principio y después empezó a descender de nuevo otra vez.

—Esto seguirá así indefinidamente, cambiando la energía de la vagoneta de cinética a potencial y viceversa, pero creo que coges la idea. —La Directora apretó otro botón en su mesa y la ventana se cerró—. Ésa es la manera obvia de ver la energía en el Mundo Clásico. Cambiará de una forma a otra de un modo continuo y suave. Ya has visto cómo la vagoneta rodaba más deprisa al bajar la cuesta de manera regular, sin grandes saltos, y no hay restricciones evidentes sobre la cantidad de energía que *puede tener* un objeto. Aquí, en el País de los Cuantos, con frecuencia no es así. En muchas situaciones a una partícula sólo se le permite tener una [energía] de entre un cierto conjunto restringido de valores y puede dar o recibir energía sólo en agregados, que llamamos *cuantos*. En el Mundo Clásico todos los pagos de energía se hacen a plazos, mediante pagos muy frecuentes y muy muy pequeños, pero aquí tales pagos han de hacerse frecuentemente como una suma entera.

En teoría cuántica es tan importante considerar energía y momento como lo es considerar posición y tiempo. De hecho, más importante, puesto que resulta más fácil medir la energía de un átomo que determinar dónde está. La energía es en cierto sentido lo equivalente en el mundo físico al dinero. La mecánica clásica la define como la «capacidad para realizar trabajo», y es necesario que las partículas

posean energía para hacer algo: realizar transiciones de un estado a otro. El momento es una magnitud más similar a la velocidad. Tiene una dirección específica, mientras que la energía sólo tiene tamaño. Cuando se ha dicho cuánta energía posee un electrón, no queda nada más por decir al respecto. Unos electrones que se mueven de izquierda a derecha y otros que lo hacen de derecha a izquierda con la misma velocidad tienen igual energía cinética, pero sus momentos son opuestos.

»Como has visto, la energía cinética es una forma espectacular y exhibicionista de energía; algo que un cuerpo posee por el mero hecho de moverse. Cuanto más masivo es, más energía cinética tiene, y cuanto más rápido se mueve, más energía cinética posee, pero la cantidad no depende en absoluto de la *dirección* en la que se mueve, sino solamente de su velocidad. En este sentido es diferente de otra importante magnitud que nos dice cómo se mueve una partícula. A dicha magnitud la llamamos *momento*. El momento es como una especie de medida de la obstinación de una partícula. Toda partícula está empeñada en seguir moviéndose como lo venía haciendo, sin cambiar en absoluto. Si algo se mueve rápidamente, hace falta una gran cantidad de fuerza para pararlo. También se necesita una gran fuerza para hacer que se mueva en una dirección *distinta*, aunque el valor de su velocidad no cambie. Ahora bien, un cambio de dirección no provoca en la partícula la menor pérdida de

su preciosa energía cinética, puesto que ésta depende sólo de la rapidez con que se mueve; no obstante, la partícula no desea cambiar porque su momento tendría que ser diferente. Las partículas son bastante *conservadoras* en ese sentido.

»Todo es cuestión de lo que llamamos *parámetros* —continuó la Directora con entusiasmo—. Si se desea describir una partícula, han de usarse los parámetros correctos. Por ejemplo, si quieres decir dónde está, debes hablar sobre su posición y tiempo.

Existen muchas variedades de energía. La energía cinética se debe directamente al movimiento: una bala de cañón en movimiento tiene una energía que no posee una quieta. La energía en reposo es otra forma, la energía en reposo de cualquier objeto es grande. En mecánica newtoniana no era preciso considerar este tipo de energía porque nunca cambiaba, y por tanto no afectaba a ninguna clase de transferencia de energía. En los procesos cuánticos, las masas de las partículas cambian con frecuencia, y el cambio de la energía en reposo puede liberarse en otras formas de energía. En un arma nuclear, por ejemplo, se libera menos de un 1% de la energía en reposo de una parte del material. Ello no significa un gran cambio de energía por partícula cuando se compara con muchos procesos investigados en física de partículas, pero resulta devastador cuando esa energía es liberada por un número significativo de partículas

en nuestro mundo cotidiano.

—Yo hubiera pensado que se necesitaría decir simplemente cuál era su posición —objetó Alicia—. Eso nos dirá dónde está, ¿no?

—No, ciertamente no. Debe darse el tiempo además de la posición. Si se desea saber dónde está algo ahora, o dónde estará mañana, no sirve decir sólo una posición si ésa es la que ocupaba la semana pasada. Ha de saberse la posición *y* el tiempo porque las cosas tienden a moverse. Del mismo modo que si se desea saber lo que *hace* una partícula debe describirse ésta en términos de momento y energía, se necesita dar en general la posición y el tiempo si se desea saber dónde está. Aquí, en el País de los Cuantos, los parámetros tienden a estar relacionados. Si se trata de ver *dónde* está algo, eso produce un efecto sobre su momento, sobre lo rápido que se mueve. Es otra forma de la relación de Heisenberg que te indiqué en el Banco.

—¡Oh! —exclamó Alicia, recordando un encuentro previo—. ¿Era ésa la razón de que el electrón que vi antes no pudiera estarse quieto para que me permitiera verlo sin hacerse completamente borroso?

—Sí, sin duda. Las relaciones de incertidumbre afectan de esa manera a todas las partículas. Siempre parecen un poco indefinidas, y nunca se las puede concretar con demasiada precisión.

»¡Ya sé lo que voy a hacer! Haré venir al Contable Incierto para que te lo explique —exclamó la Directora—. Su trabajo consiste en tratar

de saldar las cuentas, así que ha de preocuparse siempre de las fluctuaciones cuánticas.

Resulta conveniente hablar de la relación de incertidumbre de Heisenberg cuando describimos la extraña mezcla de energía y tiempo, de posición y momento, que se da en los sistemas cuánticos. El peligro en tal descripción está en que fomenta la creencia de que la naturaleza es, en el fondo, totalmente incierta, que nada puede predecirse con confianza y que, de hecho, «todo vale». *¡Eso no es verdad!*

Extendió uno de sus elegantes dedos y apretó otro de los botones de los que su mesa estaba tan bien abastecida.

Hubo una corta pausa, y entonces una de las puertas que estaban distribuidas a lo largo de la pared se abrió y entró una figura. Parecía un dibujo representando a Ebenezer Scrooge de una copia ilustrada de *Canción de Navidad*[3], salvo que su cara mostraba una expresión bastante aturdida y tenía un incontrolable temblor nervioso. Portaba un enorme libro de cuentas cuyas tapas se combaban, por no decir que se retorcían, como si su contenido estuviera en continuo movimiento.

—Creo que lo he logrado —exclamó triunfal, temblando tan violentamente que casi se le cae el libro—. ¡He conseguido ajustar

---

[3] El avaro del famoso relato de Charles Dickens. (*N. del T.*)

las cuentas! Aparte las fluctuaciones cuánticas residuales, desde luego —añadió con menos entusiasmo.

—Muy bien —respondió distraídamente la Directora—. Ahora querría que se llevara a esta niña, Alicia, y le explicara la incertidumbre cuántica y las fluctuaciones en la energía de un sistema y todo eso.



Con una señal de despedida para Alicia, la Directora volvió a su mesa y empezó una maniobra particularmente complicada con todos los botones. El Contable condujo fuera a Alicia antes de que pudiera suceder algo más.

Llegaron a un despacho mucho más pequeño y más desordenado que contenía una mesa alta y pasada de moda llena de libros de contabilidad y con numerosos papeles amontonados a lo largo y ancho del suelo. Alicia miró uno de los libros abiertos. La página estaba llena de cifras, muy similar a todos los libros de cuentas que

había visto, aquí las cifras cambiaban ligeramente de manera continua cuando las miraba.

—¡Muy bien! —dijo la figura victoriana que estaba enfrente de Alicia—. Deseas saber algo acerca de la incertidumbre, ¿no?, jovencita.

—Sí, por favor, si no es demasiada molestia —repuso Alicia educadamente.

—Bien —empezó, sentándose a su mesa. Elevó juntos los dedos a la manera profesoral tradicional para aumentar la dignidad de su apariencia, pero no fue una buena idea, pues justo entonces sufrió un temblor tan violento que hizo que sus dedos se entrelazaran y tuvo que parar para desenmarañarlos—. Bien —repitió, hundiendo sus manos en la profundidad de sus bolsillos para mayor seguridad—. Lo que debes recordar acerca de la energía es que ésta *se conserva*, lo cual significa que su cantidad es siempre la misma. Puede pasar de una forma a otra, pero la cantidad *totales* siempre la misma. Al menos lo es si se considera un período largo —añadió pensativamente, y suspiró, mirando con tristeza a lo lejos.

—Entonces ¿eso no es verdad en períodos cortos? —preguntó Alicia, que tenía la impresión de que debía decir algo para mantener viva la conversación.

—Bueno, no, no totalmente. De hecho, no en absoluto si el período es lo bastante corto. Viste la relación de Heisenberg en el anuncio de fuera del Banco, ¿no?

—Oh sí. Me dijeron que expresaba las condiciones para los préstamos de energía.

—Bueno, en cierto modo así es, pero ¿de dónde crees que procede la energía para los préstamos?

—¿Qué? Del Banco, por supuesto.

—¡Cielos, no! —dijo el Contable, un tanto horrorizado—. ¡Absolutamente no! ¡Estaría bueno que el Banco empezara a prestar energía de sus propias reservas! No —prosiguió adoptando un aire conspiratorio y mirando cuidadosamente a su alrededor—, no lo sabe todo el mundo, pero la energía no procede del Banco. De hecho, no procede de ningún sitio. Es una fluctuación cuántica. La cantidad de energía que tiene un sistema dado no es totalmente precisa, sino que puede variar aumentando o disminuyendo, y cuanto más corto es el tiempo en que ésta se mide, más probable es que varíe. En este sentido, la energía no es realmente idéntica al dinero. El dinero se conserva en períodos cortos. Si deseas tener dinero para algún propósito, has de obtenerlo de algún sitio, ¿no? Puedes sacarlo de una cuenta bancaria, o tomarlo prestado de alguien, ¡o incluso puedes robarlo!

—¡Yo no haría eso! —exclamó indignada Alicia, pero el Contable siguió hablando sin prestarle atención.

—Lo obtengas de donde lo obtengas, de alguna parte ha de proceder. Si tú consigues más, alguien tendrá menos. Eso es lo que sucede en un plazo inmediato bajo cualquier circunstancia.

»A largo plazo es diferente; puede haber inflación y entonces descubres que hay mucho más dinero circulando. Todo el mundo tiene más, pero no parece que sirva para comprar tantas cosas como antes. En cierta manera, la energía es lo completamente

opuesto. A largo plazo se conserva, la cantidad total permanece inalterada, y no existe nada semejante a la inflación económica. Todos los años se necesitará la misma cantidad de energía en promedio para pasar de un estado a otro en un átomo. A corto plazo, sin embargo, la energía no se conserva del todo. Una partícula puede coger la energía que necesita para algún propósito sin que ésta tenga que proceder de *algún sitio*; surge simplemente como una fluctuación cuántica. Tales fluctuaciones son consecuencia de la relación de incertidumbre: la cantidad de energía que se posee es *incierta*, y cuanto más corto es el tiempo en que se posee, más incierta es la cantidad que se tiene.

—Eso parece terriblemente confuso —dijo Alicia.

—¡No hace falta que me lo digas! —respondió su interlocutor enfáticamente—. ¡Lo es! ¿Te gustaría ser contable si las cifras que trataras de cuadrar estuvieran siempre fluctuando?

—¡Sería espantoso! —exclamó afectuosamente Alicia—. ¿Cómo se las arregla?

—Bueno, normalmente trato de emplear la mayor cantidad de tiempo posible en hacer los balances. Eso ayuda algo. Cuanto más tiempo emplee, menores serán las fluctuaciones residuales, ¿te das cuenta? Desgraciadamente, la gente se impacienta y viene a preguntarme si pretendo no acabar jamás los balances de las cuentas. Eso sería la única forma de hacerlo, ¿sabes? —continuó con toda seriedad—. Cuanto más tiempo me tome, más pequeñas serán las fluctuaciones de energía, así que si me *eternizo*…, bueno, entonces no habrá *ninguna* fluctuación y mis cuentas cuadrarán

perfectamente —exclamó con tono triunfal—. Pero desgraciadamente, no me dejarán en paz. Todos son demasiado impacientes y están ansiosos por realizar transiciones de un estado a otro en todo momento.

La energía puede transferirse de un átomo a otro, pero la energía total de un sistema es constante (en tanto en cuanto el sistema no intercambie energía con su entorno). Esto es absolutamente cierto en mecánica clásica. Se cumple también para períodos suficientemente largos en los sistemas cuánticos, pero durante intervalos temporales pequeños el valor de la energía fluctúa. La palabra fluctuación es más adecuada que la palabra incertidumbre, puesto que hay consecuencias físicas reales. Un ejemplo es el paso a través de una barrera durante la desintegración alfa de los núcleos; nos encontraremos con la desintegración alfa en el capítulo 8, y el traspaso de una barrera ha aparecido ya en el capítulo 1.

—Ésa es otra cosa acerca de la cual desearía preguntar —recordó Alicia—. ¿Qué son esos estados de los que continuamente estoy oyendo hablar? ¿Sería tan amable de explicármelo?

—No soy yo ciertamente la persona más adecuada para hacerlo. Forma parte de la mecánica cuántica, así que deberías dirigirte al Instituto de Mecánica y preguntar allí.

—Eso es lo que me dijeron antes —repuso Alicia—. Si ése es el mejor lugar para preguntar, ¿podría por favor indicarme cómo llegar hasta allí?

—Me temo que no puedo realmente *decirte* cómo llegar allí. Ésa no es la manera en que hacemos aquí las cosas. Pero puedo hacerlo de modo que sea muy *probable* que llegues.

Se dirigió hacia la pared más alejada de su despacho, que estaba cubierta por una cortina polvorienta. Al descorrerla de golpe, Alicia pudo ver una fila de puertas espaciadas a lo largo de la pared.

—¿Adónde conduce cada una de ellas? —preguntó—. ¿Lleva alguna al Instituto del que hablaba usted?

—*Cada una* de ellas podría conducirte a casi cualquier parte, incluido, desde luego, el Instituto. Pero lo importante es que *todas* ellas te llevarán *muy* probablemente hasta la puerta del Instituto.

—No entiendo —protestó Alicia, con un sentimiento ya demasiado familiar de creciente confusión—. ¿Cuál es la diferencia? Si cada una de ellas puede conducir a casi cualquier parte, es lo mismo decir que todas ellas podrían conducir a casi cualquier parte.

—¡No. Absolutamente no! Es algo completamente diferente. Si atravesaras *una* cualquiera de las puertas, bueno, entonces acabarías casi en cualquier parte, pero si las atraviesas *todas* a la vez acabarás muy probablemente donde deseas estar, en el pico del patrón de interferencia.

—¡Qué absurdo! —exclamó Alicia—. Me es imposible atravesar todas las puertas a la vez. Sólo puede atravesarse una puerta cada vez, ¿lo ve?

—¡Ah, eso es diferente! Desde luego, si te *veo* atravesar una puerta, entonces *atravesarás* esa puerta y sólo ésa, pero si *no* te veo, entonces es completamente posible que hayas atravesado cualquiera de ellas. En ese caso regirá la regla general.

Con un movimiento de su mano indicó un anuncio grande y llamativo fijado en la pared de enfrente de su mesa, donde no podía evitar verlo. Decía así:

¡Lo que no está prohibido
es obligatorio!

—Ésa es una de las reglas básicas que tenemos aquí. Si es posible hacer varias cosas, no se hace simplemente una de ellas, han de hacerse todas. De esa manera uno se ahorra tener que tomar resoluciones con mucha frecuencia. Así que adelante, simplemente sal a través de todas las puertas y, cuando lo hayas hecho, toma todas las direcciones a la vez. Verás que no tiene ninguna dificultad y enseguida te hallarás en el lugar deseado.

—¡Eso es ridículo! —protestó Alicia—. ¡No hay manera de que pueda atravesar todas las puertas a la vez!

—¿Cómo puedes asegurarlo antes de haberlo intentado? ¿Nunca has hecho dos cosas al mismo tiempo?

—Bueno, sí, desde luego —respondió Alicia—. He visto la televisión mientras hacía los deberes, pero para nada es lo mismo. Nunca he ido en dos direcciones al mismo tiempo.

—Entonces sugiero que lo intentes —replicó el Contable bastante enfadado—. Uno nunca sabe si puede hacer algo hasta que lo intenta. Ésa es la clase de pensamiento negativo que siempre impide el progreso. Si deseas aquí llegar a algún sitio, debes hacer *todo* lo que te sea posible y hacerlo al mismo tiempo. No has de preocuparte de adónde te llevará, ¡la interferencia se encargará de todo!

—¿Qué quiere usted decir? ¿Qué es la interferencia? —exclamó Alicia.

—No hay tiempo para explicaciones. En el Instituto de Mecánica te dirán todo acerca de eso. Ahora márchate y ellos te lo explicarán cuando llegues.

«¡Esto es realmente fatal! —pensó para sí Alicia—. Todo el mundo con quien hablo me despacha a algún otro lugar y me promete que conseguiré una explicación tan pronto como llegue allí. ¡Quiero que alguien me explique de una vez y de forma apropiada las cosas! Estoy segura de que no sé cómo puedo tomar varios caminos al mismo tiempo. Me parece absolutamente imposible, pero él está tan seguro de que aquí podré hacerlo que lo mejor es que lo intente, supongo.» Alicia abrió una puerta y pasó a través de ella.

Los caminos múltiples de Alicia

Alicia atravesó la puerta de la izquierda y se encontró en una pequeña plaza empedrada con guijarros de la que salían tres estrechos callejones. Tomó el callejón de la izquierda. Antes de haber ido muy lejos, se encontró en la orilla de una amplia zona

pavimentada. En el centro se erigía un elevado edificio negro sin ventanas en los niveles inferiores. Tenía un aspecto amenazador.

* * * *

Alicia atravesó la puerta de la izquierda y se encontró en una pequeña plaza empedrada con guijarros de la que salían tres estrechos callejones. Tomó el callejón de la derecha. Antes de haber ido muy lejos, llegó a un parque con senderos de grava cubiertos de hierbajos que serpenteaban entre lúgubres árboles inclinados. Altas verjas de acero rodeaban el parque y una espesa niebla oscurecía el paisaje en su interior.

* * * *

Alicia atravesó la puerta de la izquierda y se encontró en una pequeña plaza empedrada con guijarros de la que salían tres estrechos callejones. Tomó el callejón del centro. Antes de haber ido muy lejos, llegó a otra pequeña plaza frente a un edificio de aspecto bastante ruinoso.

* * * *

Alicia atravesó la puerta de la derecha y se encontró en una estrecha callejuela de la que salían otras dos. Tomó la callejuela de la izquierda. Antes de haber ido muy lejos, se encontró en la orilla de una amplia zona pavimentada. En el centro se erigía un elevado

edificio negro sin ventanas en los niveles inferiores. Tenía un aspecto amenazador, y tuvo la clara impresión de que ella no debía estar allí.

* * * *

Alicia atravesó la puerta de la derecha y se encontró en una estrecha callejuela de la que salían otras dos. Tomó la callejuela de la derecha. Antes de haber ido muy lejos, llegó a un parque con senderos de grava cubiertos de hierbajos que serpenteaban entre lúgubres árboles inclinados. Altas verjas de acero rodeaban el parque y una espesa niebla oscurecía el paisaje en su interior. Tuvo una fuerte impresión de que ella no debía estar allí.

* * * *

Alicia atravesó la puerta de la derecha y se encontró en una estrecha callejuela de la que salían otras dos. Siguió por la callejuela central. Antes de haber ido muy lejos, llegó a otra pequeña plaza frente a un edificio que parecía bastante deteriorado. De alguna manera le pareció que éste era el sitio en donde ella debía estar.

* * * *

Alicia atravesó la puerta del centro y se encontró enfrente de un muro con tres pórticos de arco que daban paso a sendos callejones.

Tomó el de la izquierda. Antes de haber ido muy lejos, se encontró en la orilla de una amplia zona pavimentada. En el centro de dicha zona se erigía un elevado edificio negro que carecía de ventanas en los niveles inferiores. Tenía un aspecto amenazador. En ese momento, Alicia sintió una fuerte impresión y no pudo evitar pensar que ella no se debería encontrar allí.

* * * *

Alicia atravesó la puerta del centro y se encontró enfrente de un muro con tres puertas de arco que daban paso a sendos callejones. En esta ocasión decidió no tomar el pórtico de la derecha porque ese camino parecía ser completamente erróneo.

* * * *

Alicia atravesó la puerta del centro y se encontró enfrente de un muro con tres puertas de arco que daban paso a sendos callejones. Atravesó el pórtico que conducía al callejón central. Antes de haber ido muy lejos, llegó a otra pequeña plaza frente a un edificio que parecía bastante deteriorado. Y en esta ocasión, Alicia tuvo la completa seguridad de que éste era el sitio en donde ella debía estar.

* * * *

Alicia miró más de cerca el edificio. En un descolorido cartel junto a la puerta pudo distinguir las palabras:

INSTITUTO DE MECÁNICA

¡Ciertamente, éste era el lugar donde quería llegar!

Las partículas que pueden tomar diversos caminos existen como una superposición (suma) de amplitudes. Cada posible camino contribuye con una amplitud, u opción, al comportamiento de las partículas. Las diversas amplitudes pueden interferir, combinándose entre ellas de manera que se sumen en algunas zonas para dar lugar a una elevada probabilidad de encontrar allí la partícula. En otros sitios pueden cancelarse entre sí dando lugar a una probabilidad muy baja de encontrar en ellos alguna partícula. Amplitudes e interferencias se tratan en el próximo capítulo.

Capítulo 3
El Instituto de Mecánica

Alicia examinó el edificio que tenía delante. Una estructura de simple ladrillo ya deteriorada. Enfrente de ella se hallaba el cartel que indicaba que eso era el Instituto de Mecánica. Al lado del cartel había una puerta de madera en la cual alguien había clavado una nota: «Entre sin llamar». Alicia empujó la puerta y se dio cuenta de que no estaba cerrada, así que la abrió y entró.

Tras entrar se encontró en una habitación grande y oscura, en medio de la cual había un área iluminada. En el interior de esta área limitada era posible obtener una cantidad razonable de detalles. Más allá de ella la oscuridad se extendía aparentemente sin límite haciendo imposible percibir algo con sentido. En la zona iluminada había una mesa de billar, con dos figuras moviéndose a su alrededor. Alicia caminó hacia ellas, y al acercarse se volvieron para mirarla. Era una pareja que no hacía juego. Uno era alto y anguloso. Vestía una camisa blanca almidonada con cuello duro, una corbata estrecha y, para sorpresa de Alicia, un mono. Su rostro era aquilino, con espesas patillas. La observó con una mirada tan intensa y penetrante que Alicia tuvo la impresión de que podía distinguir el mínimo detalle de lo que veía. Su compañero era más pequeño y más joven. Tenía una cara redonda, adornada con unas grandes gafas redondas con montura metálica. Resultaba extrañamente difícil ver sus ojos detrás de ellas; era difícil decir adónde miraba, o incluso dónde estaban sus ojos en realidad.

Vestía una bata blanca de laboratorio, abierta para mostrar debajo de ella una camisa deportiva con un dibujo de algo vagamente atómico en la parte delantera. No era fácil decir con exactitud lo que significaba porque parecía haberse desteñido en el lavado.

—Perdón, ¿es esto el Instituto de Mecánica? —preguntó Alicia, más que nada para iniciar la conversación. Ya sabía por el anuncio de afuera que lo era.

—Sí, mi querida niña —dijo el más alto y de aspecto más imponente de los dos—. Yo mismo soy un Mecánico Clásico del Mundo Clásico, y estoy visitando a mi colega aquí, que es un Mecánico Cuántico. Cualquiera que sea tu problema, estoy seguro de que entre los dos podremos ayudarte, si esperas un momento a que acabemos nuestras tiradas.



Ambos se volvieron hacia la mesa de billar. El Mecánico Clásico apuntó con cuidado, considerando hasta la milésima de grado los

ángulos pertinentes. Al final realizó pausadamente su tirada. Tras una vistosa serie de rebotes hacia delante y hacia atrás, la bola golpeó la bola roja lanzándola directamente al centro de un agujero.

—¡Ya está! —exclamó con satisfacción a la vez que recogía la bola de la bolsa—. Así es como hay que hacerlo; observación cuidadosa y exacta, y luego, acción precisa. Haciendo las cosas de esa manera podrás obtener el resultado que te apetezca.

Su compañero no respondió, sino que ocupó su puesto en la mesa y dio un golpe de taco impreciso. Después de sus previas experiencias recientes, Alicia no se sorprendió al descubrir que la bola salía disparada en todas las direcciones a la vez, de modo que no había ninguna parte de la mesa de la que pudiera decir con seguridad que la bola no había estado, aunque tampoco podía decir dónde se encontraba realmente ésta. Un momento después el jugador examinó una de las bolsas, introdujo en ella su mano y sacó una bola roja.

—Si no les importa que lo diga —dijo Alicia—, parecen jugar de maneras muy diferentes.

—Así es —replicó el Mecánico Clásico—. Yo detesto la manera en que él maneja el taco. Me gusta que todo se haga con mucho cuidado y precisión y que se planee detalladamente con anticipación. Sin embargo —añadió—, imagino que no has venido aquí para vernos jugar al billar; dinos, pues, qué deseabas saber.

Alicia refirió todas sus experiencias desde que llegó al País de los Cuantos y explicó lo confuso que lo encontró y cómo todo parecía tan extraño y de alguna manera indefinido.

—Y ni siquiera sé cómo llegué a encontrar este edificio —concluyó—. Se me dijo que la interferencia me traería probablemente al sitio justo, pero no entiendo en absoluto lo que sucedió.

—Bien —comenzó el Mecánico Clásico, que parecía haberse autodesignado como portavoz de ambos—. Tampoco yo puedo asegurar que realmente entienda todo. Como he dicho, me gustan las cosas claras, con la causa precediendo al efecto de manera razonable y todo claro y predecible. Si he de decir la verdad, no mucho de lo que ocurre aquí tiene demasiado sentido para mí —le susurró confidencialmente—. Vengo del Mundo Clásico sólo de visita. Ése sí es un lugar espléndido, donde todo sucede con precisión mecánica. A la causa le sigue el efecto de una manera maravillosamente predecible, así que todo tiene sentido y se sabe lo que va a ocurrir. Y lo que es más —añadió tras un instante—, todos los trenes marchan siempre a su hora.

—Eso suena como muy impresionante —dijo cortésmente Alicia—. Si está tan bien organizado, ¿es que se controla todo mediante ordenadores?



—Bueno, no —respondió el Mecánico Clásico—. No usamos ordenadores para nada. De hecho, la electrónica no funcionaría en el Mundo Clásico. Nos las arreglamos mejor con máquinas de vapor. No me siento realmente en casa en el Mundo Cuántico. Mi compañero aquí tiene mucha más familiaridad con las condiciones

cuánticas. No obstante —prosiguió más confidencialmente—, puedo decirte lo que es la interferencia. Eso también sucede en mecánica clásica. Sígueme y te mostraré cómo funciona.

Condujo a Alicia a través de una puerta y siguiendo un corto pasillo llegaron a otra habitación. Ésta se hallaba bien iluminada, con una luz clara que tenía la misma intensidad en todos los sitios y no parecía provenir de ninguna fuente en particular. Permanecieron en un estrecho corredor que circunvalaba la habitación. El piso en el centro estaba cubierto de algún tipo de material gris resplandeciente que no parecía sólido. Emitía destellos luminosos aleatoriamente, de manera parecida a un aparato de televisión cuando no está recibiendo ninguna imagen.

Su guía explicó:

—Ésta es la habitación *gedanken*, que significa una «habitación ideal» o «de pensamiento». Como sabes, muchos clubs de caballeros tienen una sala de escritura y una sala de lectura. Pues bien, nosotros tenemos una sala de pensamiento. En ella, los pensamientos pueden materializarse, de modo que cualquiera puede verlos. Ello nos permite realizar *experimentos ideales* (o *mentales*) que nos facultan para desarrollar lo que sucedería en situaciones físicas diversas, y son mucho más baratos, por supuesto.

—¿Cómo funciona? —preguntó Alicia—. ¿Se piensa simplemente en algo y ello aparece?

—Así es; en esencia eso es lo que hay que hacer.

—¿Puedo probar, por favor? —preguntó Alicia.

—Sí, desde luego, si lo deseas.

Alicia concentró intensamente su pensamiento en la parpadeante superficie. Para su sorpresa y deleite, en lo que antes había sido un área monótona ahora había un grupo de peludos conejos saltarines.

—Sí, muy bonito —dijo el Mecánico con bastante impaciencia—. Pero esto no ayuda a explicar la interferencia.

Hizo un gesto y todos los conejos desaparecieron, todos excepto uno que permaneció inadvertido en un rincón.

—La interferencia —comenzó con autoridad— es algo que sucede con ondas. Puede haber ondas de todas clases en los sistemas físicos, pero lo más sencillo será considerar ondas de agua.

Miró intensamente al suelo, que se convirtió ante los ojos de Alicia en una lámina de agua, con suaves ondulaciones que se desplazaban por su superficie. En el rincón, el conejo desapareció debajo de la superficie con un «plop» cuando el suelo bajo sus patas se convirtió en agua. Se esforzó para emerger de nuevo y los miró con rabia. Después se agitó, miró con tristeza su piel mojada y desapareció.

—Ahora deseamos algunas ondas —continuó el Mecánico Clásico, sin prestar ninguna atención al infeliz conejo.

Alicia concentró servicialmente su pensamiento en el suelo y una larga ola encrespada surgió deslizándose a lo largo de la superficie para acabar rompiéndose con espectacularidad en una playa que había en un extremo.

—No, ésa no es la clase de ondas que deseamos. Esas grandes olas rompedoras son demasiado complicadas. Queremos un tipo de onda

más suave, como la que se difunde cuando se tira una piedra al agua.

Al tiempo que hablaba, una serie de ondulaciones circulares se esparcieron desde el centro de la superficie del agua.

—Pero necesitamos pensar en lo que llamamos *ondas planas*, las cuales se mueven todas en la misma dirección.

Las ondulaciones circulares se convirtieron en una serie de largos surcos paralelos, como un terreno arado, moviéndose todas a través del suelo de un lado al otro.

—Ahora ponemos una barrera en medio.

Una valla baja surgió en el centro, dividiendo en dos el suelo. Las ondas fluían hacia la barrera y chapoteaban contra ella, pero no había manera de que pudieran atravesarla, y el agua del otro lado permanecía en calma.

—Ahora hacemos un agujero en la barrera, de manera que las ondas puedan pasar a través de él.

Una pequeña abertura apareció justo a la izquierda del punto central de la barrera. Las ondas que incidían sobre esta estrecha abertura podían atravesarla y expandirse en ondulaciones circulares en la tranquila región del otro lado.

—Y ahora mira lo que ocurre cuando tenemos dos huecos en la barrera —exclamó el Mecánico.

De manera brusca aparecieron agujeros a derecha e izquierda del centro de la barrera. Desde ambos se expandían ondulaciones circulares. Alicia pudo observar que donde éstas se cruzaban había algunos lugares en los que el agua oscilaba hacia arriba y hacia

abajo mucho más de lo que lo hacía cuando sólo había un agujero, mientras que en otros el agua apenas se movía y estaba localmente en absoluto reposo.

—Podrás ver lo que está sucediendo si congelamos el movimiento. Podemos hacer eso en un experimento mental, por supuesto.

Se detuvo todo movimiento en el agua y las ondulaciones se congelaron en una posición determinada, como si todo el lugar se hubiera convertido instantáneamente en hielo.

—Ahora marcaremos las regiones de amplitud máxima y mínima —continuó el Mecánico Clásico con determinación—. La amplitud es la distancia en que se mueve el agua a partir del nivel superficial que tenía cuando estaba en calma.

Aparecieron dos flechas fluorescentes, suspendidas en el espacio encima de la superficie. Una era de color verde manzana y señalaba hacia un punto donde la perturbación era mayor; la otra era de un color rojo pálido y señalaba un lugar donde la superficie estaba prácticamente en calma.

—Podrás ver lo que está sucediendo si observamos el efecto de un solo agujero cada vez —dijo, con creciente entusiasmo.

Una de las aberturas en la valla desapareció, y entonces quedaron sólo las ondulaciones que se expandían desde la otra, aunque todavía congeladas en su posición, como si estuvieran hechas de cristal.

—Ahora cambiaremos al otro agujero.

Alicia pudo ver que había muy poca diferencia al hacerlo. La posición de la abertura se había movido y el patrón de ondas

circulares provenientes de ella se había desplazado ligeramente, pero en conjunto tenía prácticamente el mismo aspecto.

—Me temo que no soy capaz de entender lo que intenta mostrarme. Los dos casos me parecen iguales.

—Te ayudará a ver la diferencia si pasamos rápidamente de un caso al otro.

Ahora la abertura en la valla saltó de un lado al otro, primero a la derecha y después a la izquierda. Al moverse, el patrón de ondas en la superficie se desplazaba ligeramente adelante y atrás.

—Observa los patrones ondulatorios debajo de la flecha verde — exclamó el Mecánico, quien le parecía a Alicia haberse entusiasmado innecesariamente con el asunto. No obstante, hizo lo que se le pedía y vio que en el punto indicado había una elevación del agua en cada caso—. Cada rendija de la valla ha producido una onda que es alta en ese punto concreto, de modo que cuando ambas rendijas están abiertas, la onda es el doble de alta aquí y la subida y descenso globales del agua son mucho mayores que para una rendija sola. Esto se denomina interferencia *constructiva.*

»Observa ahora los patrones ondulatorios debajo de la flecha roja — Alicia vio que cuando una abertura daba lugar a una elevación en ese punto la otra producía una depresión en la superficie—. Puedes ver que en esta posición la onda proveniente de una de las aberturas va hacia arriba y la de la otra va hacia abajo, de modo que cuando ambas están presentes se cancelan entre sí y el efecto total es nulo. Eso se denomina interferencia *destructiva.*

»Eso es todo lo que hay realmente acerca de la interferencia de ondas. Cuando dos ondas se solapan y se combinan entre sí, sus amplitudes, las cantidades que expresan lo que suben o bajan, se combinan asimismo entre sí. En algunos lugares todas las ondas van en la misma dirección, de modo que las perturbaciones se suman y se obtiene un efecto grande. En otras posiciones van en direcciones diferentes, de modo que se anulan entre sí.

—Sí, creo que ya lo sigo —dijo Alicia—. De manera que usted dice que las puertas del Banco actuaron de manera muy parecida a las rendijas aquí en la valla, produciendo un efecto grande en el lugar donde yo debía estar y anulándose entre sí en las demás posiciones. Sin embargo, no veo cómo eso puede aplicarse a mi caso. Con su onda de agua, usted dice que en un sitio existe la mayor parte de la onda y en otro una parte menor debido a esa interferencia, pero la onda se esparce sobre todo el área, mientras que yo estoy en un solo lugar en cada instante.

La interferencia es en física clásica una propiedad de las ondas. Se da cuando amplitudes, o perturbaciones, procedentes de distintas fuentes llegan a la vez, pudiendo sumarse en ciertos lugares y restarse o anularse en otros. El resultado es que habrá regiones de actividad intensa y otras de baja actividad. Puede verse tal efecto en lo que sucede cuando se cruzan las estelas que dejan a su paso dos barcos. Los efectos de interferencia pueden también

ocasionar una mala recepción de la señal de televisión cuando las ondas reflejadas por un edificio interfieren con las de la señal directa. La interferencia requiere distribuciones extensas y solapadas. Cada partícula, desde una concepción clásica, se encuentra en una sola posición y entonces dichas partículas no interfieren.

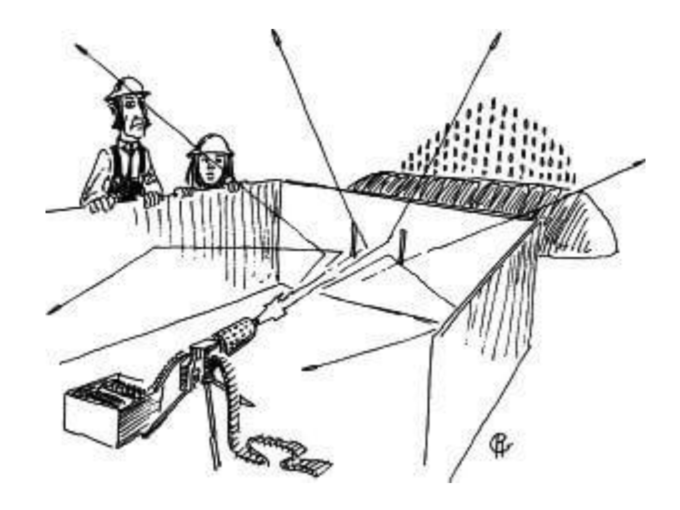
—¡Exactamente! —exclamó de modo triunfal el Mecánico Clásico—. Ése es el problema. Como dices, tú estás en un lugar. Eres más como una partícula que como una onda, y las partículas se comportan de forma muy diferente en un Mundo Clásico razonable. Una onda se difunde sobre un área amplia y se observa una pequeña parte de ella en cualquier posición. Debido a la interferencia, se obtiene una mayor o menor cantidad de ella en posiciones diferentes, pero sólo es una pequeña parte de la onda total en cualquier sitio donde se mire. Por el contrario, una partícula está localizada en algún punto. Si te fijas en diversas posiciones, verás, en cada una, o la totalidad de la partícula o que ésta simplemente no se encuentra allí. En mecánica clásica no es posible que las partículas muestren interferencias, como podemos demostrar.

Volvió la mirada hacia el suelo de la habitación *gedanken* y lo contempló fijamente. La superficie acuática se transformó en un área llana de acero, con barreras blindadas en torno a los bordes, lo suficientemente altas para ocultarse tras ellas. En la mitad del

suelo, donde antes se extendía la valla sobre el agua, había ahora una alta pared blindada, con una estrecha rendija ligeramente a la izquierda del centro.

—Ahora podemos contemplar un montaje análogo, sólo que lo he cambiado para que podamos observar partículas rápidas. Éstas podrían ser algo así como balas de un arma de fuego, de manera que eso es lo que usaremos.

Hizo un ademán hacia un extremo de la habitación, en donde apareció una amenazadora ametralladora con muchas cajas de munición apiladas a su lado.



—El soporte de esta arma es inestable, de modo que no dispara siempre en la misma dirección. Algunas de las balas acertarán a pasar a través de la rendija en la pared, como hacía parte de la onda en nuestro experimento mental previo. Desde luego, la mayoría de ellas harán impacto en la pared de acero y rebotarán. ¡Ah!, eso me recuerda —añadió precipitadamente— que haríamos mejor

poniéndonos esto, no vaya a ser que nos alcance una bala de rebote. —Sacó un par de cascos de acero y pasó uno a Alicia.

—¿Realmente los necesitamos? —preguntó Alicia—. Si sólo se trata de un experimento mental, con seguridad las balas son mentales y no pueden hacernos daño alguno.

—Bueno, tal vez. Pero aun así podrías *pensar* que una bala te había alcanzado, y eso no sería muy agradable, ¿no crees?

Alicia se puso el casco. No podía sentirlo sobre su cabeza y no creía que tuviera la menor utilidad, pero no parecía tener sentido prolongar la discusión. El Mecánico permaneció bien derecho y movió imperativamente su mano; la ametralladora empezó entonces a disparar muy ruidosamente. Las balas salieron de una manera irregular; la mayoría hizo impacto sobre la pantalla blindada y salieron rebotadas en todas las direcciones, pero unas cuantas atravesaron la rendija e impactaron en la pared opuesta. A Alicia le intrigó comprobar que cuando una bala alcanzaba esa pared, se paraba de inmediato y después ascendía lentamente en el aire hasta quedar suspendida en el espacio exactamente sobre el punto de la pared donde había hecho impacto.

—Como puedes observar, mientras la onda de agua se esparcía por completo sobre la pared más alejada, una bala la alcanza en un solo punto. Sin embargo, en este experimento la probabilidad de que la bala dé en la pared opuesta a la rendija es mayor que la de que rebote en el borde de la rendija y salga muy desviada. Si esperamos un poco veremos cómo varía la probabilidad para diferentes puntos a lo largo de la pared.

Conforme transcurría el tiempo y el aire se llenaba de balas voladoras, el número de las suspendidas encima de la pared crecía constantemente. Al mirar, Alicia pudo ver que iba desarrollándose una clara tendencia.

—Ya ves cómo se distribuyen a lo largo de la pared las balas que han atravesado la rendija —señaló el Mecánico cuando la ametralladora quedó en silencio—. La mayoría ha acabado directamente en un lugar opuesto a la rendija, y el número decrece al alejarse de aquél a la derecha o a la izquierda. Veamos ahora lo que sucede cuando la rendija se sitúa a la derecha.

Tras otro movimiento de su mano, las balas colgantes cayeron al suelo y la ametralladora empezó a disparar de nuevo. Aunque la demostración era ruidosa y bastante desordenada, hasta donde podía ver Alicia, el resultado era justamente el mismo que el de la última vez. Francamente, era decepcionante.

—Como puedes ver —dijo el Mecánico con una confianza fuera de lugar—, la distribución es similar a la anterior, pero ligeramente desplazada a la derecha porque el centro está ahora enfrente de la nueva posición de la rendija.

Alicia no podía ver ninguna diferencia, pero estaba dispuesta a creerlo.

—Ahora —continuó el Mecánico teatralmente—, mira lo que sucede cuando *ambas* rendijas están abiertas.

Hasta donde podía ver Alicia, no había la menor diferencia, excepto que, como las dos rendijas estaban abiertas, llegaban más balas a la pared alejada. Esta vez se decidió a hacer un comentario:

—Me temo que me parece igual todas las veces —dijo como excusándose.

—¡Exactamente! —replicó el Mecánico con satisfacción—. Salvo que, como sin duda habrás observado, ahora el centro de la distribución se encuentra en medio de las dos rendijas. Tenemos una distribución de probabilidad de que las balas atraviesen la rendija izquierda y otra distribución de probabilidad de que atraviesen la rendija derecha. Cuando las dos están abiertas, las balas pueden pasar por cualquiera de ellas, así que la distribución de probabilidad total viene dada por la suma de las dos anteriores, puesto que las balas pueden pasar por una *u* otra. No pueden pasar por *ambas*, ¿verdad? —añadió, dirigiéndose al Mecánico Cuántico, que acababa de entrar en la habitación.

—Eso es lo que tú dices —replicó su colega—, pero ¿cómo puedes estar tan seguro? Mira lo que sucede cuando repetimos tu experimento *gedanken* con electrones.

Entonces, el Mecánico Cuántico movió la mano hacia el suelo. Sus ademanes no eran tan decididos como los de su compañero, pero parecían funcionar igual de bien. La ametralladora y las paredes blindadas desaparecieron. El suelo se convirtió en el material trémulo que Alicia había visto al principio, pero la pared ya familiar con dos rendijas en el medio seguía allí, extendiéndose a lo largo de la línea media del suelo. En la parte más alejada del mismo había una ancha pantalla con un destello verdoso.

—Eso es una pantalla fluorescente —susurró el Mecánico en el oído de Alicia—. Emite un destello luminoso cuando la alcanza un

electrón, de modo que puede emplearse para detectar dónde se hallan éstos.

En el otro lado del suelo, donde antes había estado situada la ametralladora, había ahora una especie de cañón. Era un pequeño cacharro corto y grueso, como una versión muy reducida de los cañones que a veces se emplean en los circos para lanzar personas.

—¿Qué es eso? —preguntó Alicia.

—Es un *cañón de electrones*, por supuesto.

Al mirar con más detenimiento, Alicia alcanzó a ver unos cortos escalones que conducían a la boca del cañón y una fila de electrones esperando ser disparados. Le parecían mucho más pequeños que los que había visto antes.

«Pero, claro —dijo para sí—, éstos sólo son electrones *mentales*».

Cuando los miraba, se sorprendió al ver que los electrones se volvían y la saludaban.

«Me pregunto cómo me conocen —se dijo—. Supongo que entonces *todos* ellos son el mismo electrón que he conocido antes.»

—¡Fuego! —ordenó el Mecánico Cuántico, y los electrones se precipitaron por los escalones al interior del cañón saliendo disparados de éste en una corriente uniforme. Alicia no podía distinguirlos cuando estaban en vuelo, pero veía un destello brillante allí donde cada uno de ellos alcanzaba la pantalla. Al apagarse cada destello, quedaba una estrellita resplandeciente que se levantaba por encima de la pantalla y proporcionaba así una señal de la posición a la que había llegado el electrón.

Como en el caso anterior de la ametralladora, el cañón de electrones continuó disparando su corriente de electrones y el montón de estrellitas resplandecientes empezó a componer una distribución reconocible. Al principio Alicia no podía estar demasiado segura de lo que veía, pero cuando el número de estrellitas mostradas se hizo mayor, estuvo claro que la distribución de éstas era complemente distinta de la representada por el anterior conjunto de balas.

En vez de un decrecimiento lento y constante a partir de un número máximo en el centro, las estrellas se disponían ahora en bandas, con brechas oscuras entre ellas en las cuales había unas pocas, o ninguna, marcas resplandecientes. Alicia se dio cuenta de que ocurría en cierta manera como en el caso de las ondas de agua, donde había habido regiones de gran actividad con otras en calma. Ahora existían regiones en las que se detectaban muchos electrones y otras a las que habían llegado muy pocos. Por eso no se sorprendió mucho cuando el Mecánico Cuántico dijo:

La evidencia experimental más fuerte del comportamiento cuántico viene dada por el fenómeno de interferencia. Cuando un resultado observado puede llegar por diversos caminos, estará de hecho presente una amplitud para cada camino. Además, si esas amplitudes de alguna manera se juntan, pueden sumarse o restarse, y la distribución total de probabilidad muestra claros máximos y mínimos y alternancia de bandas intensas y vacías. Este efecto se ve en

la práctica en todos los sitios donde se espera que ocurra. Una forma de interferencia produce los conjuntos de estados de energía definidos que se dan en los átomos. Sólo esos estados que «se acomodan limpiamente» dentro del potencial interfieren positivamente para dar un máximo pronunciado en la probabilidad. Otros estados cualesquiera se cancelan entre sí y por consiguiente no llegan a existir.

—Ahí ves un claro efecto de interferencia. Con las ondas de agua, se tenían regiones de mayor y menor movimiento en la superficie. Ahora cada electrón se detecta en una sola posición, pero la *probabilidad* de detectar un electrón varía de una posición a otra. La distribución de las diferentes intensidades de onda que viste antes se sustituye por una distribución de probabilidad. Con uno o dos electrones, una distribución tal no es evidente, pero cuando se emplea un montón de electrones se encuentra un mayor número de ellos en las regiones de probabilidad alta. Con una sola rendija habríamos visto que la distribución decrecía suavemente a cada lado, análogamente a lo que hacían las balas o las ondas de agua cuando sólo hay una rendija. En este caso vemos que, cuando las dos rendijas están abiertas, las amplitudes procedentes de ambas interfieren, produciendo cimas y nodos evidentes en la distribución de probabilidad. El comportamiento de los electrones es completamente diferente del de las balas de mi amigo.

—No lo entiendo —dijo Alicia. Le parecía que esto era lo único que decía siempre—. ¿Quiere decir que hay tantos electrones circulando que los que atraviesan una rendija de alguna manera interfieren con los que pasan por la otra?

—No, no es eso lo que quiero decir. Rotundamente no. Ahora verás lo que sucede cuando sólo hay un electrón en vuelo cada vez. —Y dando una palmada, gritó—: ¡Muy bien! Vamos a repetirlo, pero ahora más lentamente.

Los electrones se dispusieron a actuar o, para decirlo con precisión, uno subió hasta el interior del cañón y salió disparado. Los otros permanecieron donde estaban. Algo más tarde otro electrón actuó de la misma manera. Esto continuó durante algún tiempo, y Alicia pudo ver cómo surgía el mismo patrón de cimas y nodos. Las cimas y los nodos no eran esta vez tan claros como en el caso anterior porque el ritmo lento al que llegaban los electrones daba a entender que no había muchos de ellos implicados.

—Ves, pues, que el efecto de interferencia funciona igual de bien cuando sólo hay un electrón presente en cada instante. Un electrón puede mostrar interferencia por sí mismo. Puede atravesar ambas rendijas a la vez e interferir consigo mismo, por así decirlo.

—¡Pero eso es estúpido! —exclamó Alicia—. Un electrón no puede pasar por ambas rendijas. Como dijo el Mecánico Clásico, eso sencillamente no es sensato.

Fue hasta la barrera y miró más de cerca tratando de ver adónde se dirigían los electrones cuando atravesaban las barreras. Por desgracia, la luz era pobre y los electrones se movían tan

rápidamente que no pudo distinguir por cuál de las rendijas había pasado cada uno. «Esto es ridículo —pensó—. Necesito más luz.» Había olvidado que estaba en la «sala de pensamiento» y se sobresaltó cuando muy cerca de ella apareció un intenso foco luminoso colocado sobre un estante. Dirigió rápidamente la luz hacia las dos rendijas y le agradó ver que había un destello visible cerca de una o de la otra cuando la atravesaba el electrón.

—¡Lo he conseguido! —exclamó—. Puedo ver los electrones cuando atraviesan las rendijas, y sucede justo como dije que debía suceder. Cada uno pasa ciertamente por una sola de ellas.



—¡Ajá! —replicó con seguridad el Mecánico Cuántico—. Pero ¿has tratado de ver qué le sucede al patrón de interferencia?

Alicia miró hacia atrás a la pantalla y quedó sorprendida al ver que ahora la distribución de estrellitas decaía con suavidad a partir de un máximo central, justamente como la distribución de balas clásicas que había visto antes. En cierta manera eso no parecía justo.

—Así es como sucede siempre; no hay nada que pueda hacerse al respecto —dijo el Mecánico Cuántico con calma—. Si no se hace ninguna observación que muestre por cuál de las rendijas pasa cada electrón, se obtiene interferencia entre los efectos de ambas. Si se observan realmente los electrones, se encuentra que *están* ciertamente en un lugar u otro, no en ambos, *pero* en ese caso ellos actúan como se esperaría si hubieran pasado por una sola rendija y no se obtiene ninguna interferencia. El problema es que no hay manera de que puedan observarse los electrones sin perturbarlos, como cuando has arrojado luz sobre ellos, y el simple acto de realizar la observación fuerza a los electrones a escoger una trayectoria. No importa si tomas o no nota de por cuál de las rendijas pasa el electrón. No importa si eres o no consciente de por cuál de ellas pasa. Cualquier observación que *pudiera* llegarte perturbaría el electrón y detendría la interferencia. Los efectos de interferencia suceden sólo cuando no hay manera de determinar por cuál de las rendijas pasa el electrón. El que esto se sepa o no nos da lo mismo.

»Así que ya ves: cuando existe interferencia parece como si cada electrón pasara a través de ambas rendijas. Si trataras de comprobarlo, encontrarías que cada uno de los electrones pasa por una sola rendija, pero entonces la interferencia desaparece. ¡Eso es así!

Alicia meditó un momento sobre ello.

—¡Eso es completamente ridículo! —decidió.

—Lo es, ciertamente —repuso el Mecánico con una sonrisa de suficiencia—. Totalmente ridículo, de acuerdo, pero, como es asimismo el modo de funcionar de la naturaleza, hemos de vivir con él. Complementariedad, ¡ése es mi lema!

—¿Podría, por favor, decirme qué significa *complementariedad* para usted?

—Claro, desde luego. Por complementariedad quiero decir que hay ciertas cosas que no pueden saberse, no de manera absoluta al mismo tiempo, en cualquier caso.

—Complementariedad no significa eso —protestó Alicia.

—Significa eso cuando yo la uso —replicó el Mecánico—. Las palabras significan lo que yo escojo. Es una cuestión de quién ha de ser el que manda, eso es todo. Complementariedad, ése es mi lema.

—Ya dijo eso antes —señaló Alicia, a quien esta última afirmación no la había convencido del todo.

—No, no lo hice —dijo el Mecánico—. Esta vez significa que hay preguntas sobre una partícula que no pueden hacerse, tales como dónde está y al mismo tiempo qué velocidad tiene. De hecho puede no tener sentido hablar de un electrón que *tiene* una posición exacta.

—¡Eso es darle mucha importancia al significado de una palabra! —exclamó Alicia agriamente.

—Claro, ciertamente —repuso el Mecánico—. Pero cuando obligo a una palabra a hacer un trabajo extra le pago más. Me temo que no puedo explicar realmente lo que les sucede a los electrones. De una explicación se requiere normalmente que tenga sentido en términos

de cosas que se conocen, y la mecánica cuántica no hace eso. Parece no tener sentido, pero funciona. Probablemente no me equivoco al decir que nadie entiende en realidad la mecánica cuántica, de manera que no puedo *explicarla*, pero puedo decirte cómo *describimos* lo que acontece. Ven a la habitación trasera y trataré de hacerlo lo mejor que pueda.



En mecánica cuántica una partícula es como una onda y una onda es como una partícula. Ambas son la misma cosa. Los electrones y la luz muestran efectos de interferencia, pero cuando son detectados lo son como cuantos individuales y se observa cada uno de ellos en un lugar.

La interferencia entre los diferentes caminos que puede tomar una partícula dará lugar a una distribución de probabilidad con máximos y mínimos pronunciados, lo que significa que es más *probable* que se detecte una partícula en ciertos lugares que en otros.

Abandonaron la habitación de pensamiento, cuyo suelo había vuelto a su aspecto parpadeante anterior, y siguiendo por el corredor llegaron a otra habitación amueblada con armarios dispersos. Tras haberse sentado, el Mecánico Cuántico prosiguió.

—Cuando hablamos acerca de una situación como los electrones que atraviesan las rendijas, la describimos como una *amplitud*. Esto es algo similar a las ondas de agua que observaste, y, de hecho, en vez de amplitud, frecuentemente se la llama *función de ondas*. La amplitud puede pasar a través de ambas rendijas y no es siempre positiva, como lo es una probabilidad. La menor probabilidad que puede tenerse es cero, pero la amplitud puede ser negativa o positiva, así que las partes procedentes de diferentes caminos pueden cancelarse o sumarse y producen interferencia, de nuevo justamente igual que la onda de agua.

—¿Dónde están entonces las partículas? —preguntó Alicia—, ¿por cuál de las rendijas pasan realmente?

—Las amplitudes no informan realmente de eso. Sin embargo, si se toma el *cuadrado* de la amplitud, esto es, si se multiplica por sí misma de modo que su resultado es siempre positivo, entonces nos proporciona una *distribución de probabilidad*. Si escoges una posición cualquiera, eso te dirá la probabilidad de que al observar una partícula la encuentres en dicha posición.

—¿Es eso todo lo que puede decirme? —exclamó Alicia—. Debo señalar que parece muy insatisfactorio. Nunca se sabría dónde va a estar algo.

—Sí, eso es bastante cierto. En el caso de *una* partícula, no puede decirse dónde se encontrará, salvo, por supuesto, que no estará en una posición donde la probabilidad es cero. Ahora bien, si se tiene un gran número de partículas, entonces uno puede estar muy seguro de que habrá más donde la probabilidad es elevada y

muchas menos donde ésta es baja. Si se tiene un número *muy* grande de partículas, puede decirse con mucha precisión cuántas acabarán en un sitio determinado. Ése era el caso de esos albañiles de los que nos hablaste. Ellos sabían lo que obtendrían porque usaban gran número de ladrillos. Para números verdaderamente grandes, la seguridad global es muy buena.



—¿Y no hay manera de que pueda decirse lo que hace cada partícula hasta que se la observa? —repitió Alicia, para tener eso claro.

—No, ninguna manera. Cuando lo que se observa puede haber sucedido de varios modos, entonces se tiene una amplitud para cada uno de los modos, y la amplitud total viene dada por la suma de estas amplitudes. Se tiene una *superposición* de estados. En cierto sentido, la partícula hace todo lo que tendría la posibilidad de hacer. No es simplemente que no se *sabe* lo que hace la partícula. La interferencia muestra que todas las posibilidades están presentes e influyen unas en otras. De algún modo todas ellas son reales. Todo lo que no está prohibido es obligatorio.

—¡Oh!, vi eso en un anuncio en el Banco. Parecía muy severo.

—¡Es mejor que lo creas! Es una de las reglas principales aquí. Donde hay varias cosas que podrían suceder, todas suceden. Mira el gato, por ejemplo.

—¿Qué gato? —preguntó Alicia, mirando confusa a su alrededor.

—El Gato de Schrödinger, allí. Nos lo dejó para que lo cuidásemos.

Alicia miró hacia el rincón que señalaba el Mecánico y vio un gran gato orejudo durmiendo en una cesta. Como si se hubiera despertado al oír su nombre, el gato se levantó y se desperezó. O, más bien, lo hizo y no lo hizo. Alicia pudo ver que, junto a la ligeramente borrosa figura del gato levantado con el lomo arqueado sobre la cesta, resultaba que había otro gato idéntico que todavía estaba echado en el fondo de ésta. Estaba muy rígido y quieto y descansaba en una posición muy poco natural. A juzgar por su aspecto, Alicia diría que estaba muerto.

—Schödinger ideó un experimento *gedanken* (ideal o mental) en el que un desafortunado gato era encerrado en una caja con una ampolla de gas venenoso y un mecanismo que rompería la ampolla si una muestra de material radiactivo se desintegraba. Ahora bien, tal desintegración es decididamente un proceso cuántico. El material podría desintegrarse o no; así que, de acuerdo con las reglas de la física cuántica, se tendría una superposición de estados, en algunos de los cuales la desintegración habría ocurrido y en otros no. Por supuesto, para los estados en los que la desintegración se hubiera producido, el gato habría muerto, de modo que se tendría una superposición de estados del gato, en unos muerto y en otros vivo. Cuando se abriera la caja, y alguien observara al gato, unas veces estaría muerto y otras vivo. La cuestión planteada por Schödinger era: «¿Cuál era el estado del gato antes de abrir la caja?».



—¿Y qué sucedió cuando se abrió la caja? —preguntó Alicia.

—Bueno, en realidad todo el mundo estaba tan enzarzado en discutir la cuestión que nadie abrió la caja, lo cual es la razón de que el gato se quedara como ahora está.

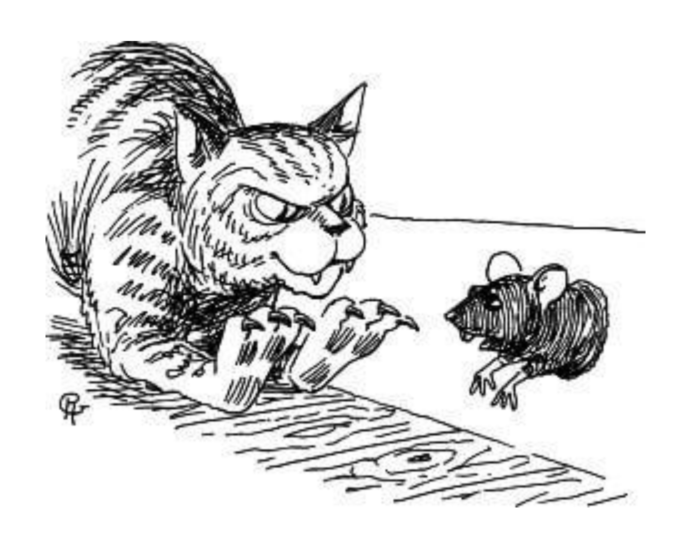
Alicia miró de cerca la caja, en donde un aspecto del gato estaba muy ocupado lamiéndose.

—Me parece muy vivo —observó.

Tan pronto como esas palabras salieron de su boca, el gato se hizo completamente sólido y la versión muerta se desvaneció. Con un ronroneo de satisfacción, el gato saltó fuera de la caja y comenzó a acosar a un ratón que había salido inesperadamente de la pared. Alicia observó que no había ningún agujero visible; el ratón había salido simplemente de la pared. El Mecánico Cuántico siguió la dirección de su mirada.

—¡Ah, sí! Ése es un ejemplo de paso a través de una barrera; lo vemos ocurrir continuamente. Donde hay una región en la que una

partícula no puede entrar según la mecánica clásica, la amplitud no se anula en el borde bruscamente, aunque «muere» rápidamente al adentrarse en la región. Si ésta es muy estrecha, aún queda alguna amplitud pequeña al otro lado de ella, y eso proporciona una pequeña probabilidad de que la partícula pueda aparecer allí (al otro lado de la región) tras haber aparentemente «tuneleado» a través de una barrera insuperable. Sucede aquí muy frecuentemente.



Alicia había estado pensando en lo que había visto y había advertido una dificultad.

—¿Cómo es que fui capaz de hacer una observación y fijar la condición del gato si él no pudo hacerlo por sí mismo? ¿Qué es lo que decide cuándo se hace realmente una observación y quién puede hacerla?

—Ahí has puesto el dedo en la llaga —replicó el Mecánico Cuántico—, pero nosotros sólo somos mecánicos después de todo, de modo que no nos preocupamos demasiado de esas cosas. Nosotros simplemente procedemos con nuestro trabajo y empleamos

métodos que sabemos que funcionarán en la práctica. Si deseas que alguien discuta el *problema de la medida* contigo, necesitarás ir a algún lugar más académico. Sugiero que asistas a una clase en la Escuela de Copenhague.

—¿Y cómo llego allí? —pregunto Alicia, resignada de nuevo a verse remitida a otro sitio. Como respuesta, el Mecánico la condujo al corredor y abrió otra puerta. Ésta no conducía a la callejuela por la que había entrado, sino a un bosque.

Capítulo 4
La Escuela de Copenhague

Alicia entró en el bosque y siguió su camino a lo largo de una senda que serpenteaba entre los árboles, hasta que llegó a un lugar donde ésta se bifurcaba. Había una señal en la bifurcación, pero no parecía ser de demasiada ayuda. La flecha que apuntaba hacia la derecha mostraba la letra «A», y la que señalaba hacia la izquierda, la letra «B»; eso era todo.

—Afirmo solemnemente —exclamó Alicia con exasperación— que es la señal más inútil que jamás he visto.

Miró a su alrededor para ver si había algún indicio de adónde podrían conducir las sendas y entonces se sorprendió al ver al Gato de Schrödinger en la rama de un árbol unos metros más allá.



—¡Oh, gato! —empezó a decir con timidez—, ¿podrías, por favor, decirme qué camino debo tomar desde aquí?

—Eso depende bastante de adónde desees ir —dijo el gato.

—No estoy realmente segura de dónde... —comenzó a decir Alicia.

—Entonces no importa el camino que sigas —la interrumpió el gato.

—Pero tengo que decidir entre esas dos sendas —dijo Alicia.

—¡Ajá!, ahí es donde te equivocas —dijo meditativamente el gato—. No tienes que decidir, puedes tomar todos los caminos. Seguro que ya has aprendido eso. En lo que a mí respecta, hago frecuentemente nueve cosas diferentes a la vez. Los gatos pueden merodear en cualquier sitio cuando no son observados. Hablando de observaciones —dijo apresuradamente—, creo que estoy a punto de ser obs... —en ese instante el gato se desvaneció de golpe.

«¡Qué gato tan extraño! —pensó Alicia—, ¡y qué extraña sugerencia! Debe referirse a la superposición de estados que mencionaba el Mecánico. Creo que debe de ser algo parecido a cuando salí del Banco. Entonces me las arreglé de alguna manera para ir en diferentes direcciones, así que supongo que debo tratar de hacer otra vez lo mismo.»

* * * *

Estado: Alicia (A1)

Alicia giró a la derecha en la señal y siguió caminando por la sinuosa senda, mirando al pasar los árboles a su alrededor. No había ido muy lejos cuando llegó a otra bifurcación de la senda; esta

vez el poste de señalización tenía dos brazos, marcados como «1» y «2». Giró a la derecha y prosiguió su camino.

Al continuar su marcha, el bosque se hizo menos espeso y se encontró subiendo penosamente por un camino rocoso que cada vez era más empinado, hasta que se encontró ascendiendo la ladera de una montaña solitaria. El camino la condujo por una estrecha cornisa que corría a lo largo de un escabroso acantilado que acababa en una pequeña área con bordes verticales cubierta de hierba. Ante sus ojos aparecía una boca abierta en la parte delantera del acantilado, desde la cual descendía un pasadizo al interior de aquél.

El pasadizo estaba muy oscuro, pero Alicia, sorprendida, se encontró arrastrándose por él. El suelo y las paredes eran lisos, y se dirigía directamente, descendiendo con suavidad, hacia un resplandor distante apenas visible. Al seguir su marcha, la luz se fue haciendo más brillante y más roja y el túnel se hizo más caliente. Briznas de vapor flotaban a su alrededor y oyó un sonido como el ronquido de un gran animal.

Al final del túnel Alicia atisbo un gran sótano. Su oscura inmensidad podía sólo sospecharse confusamente, pero había un brillo intenso que emanaba casi de debajo de los pies de Alicia. Tendido allí, había un enorme dragón de un color de oro rojizo profundamente dormido, con su enorme cola enrollada en torno a su cuerpo. Debajo de él, y a modo de lecho, había un enorme montón de oro, plata, joyas y objetos maravillosamente labrados, todos teñidos de rojo por la intensa luz rojiza.

Estado: Alicia (A2)

Alicia giró a la derecha en la señal y siguió caminando por la sinuosa senda, mirando al pasar los árboles a su alrededor. No había ido muy lejos cuando llegó a otra bifurcación del camino; esta vez el poste de señalización tenía dos brazos, marcados con «1» y «2». Giró a la izquierda y prosiguió su camino.

Cuando iba caminando, miró hacia abajo y encontró que el camino por donde marchaba ya no era un sendero forestal sino una carretera estrecha pavimentada con ladrillos amarillos. Siguió ésta a través de los árboles hasta que el bosque se abrió dando paso a un ancho prado. Era muy ancho, se extendía hasta donde podía alcanzar su vista y estaba cubierto por entero de brillantes amapolas. La carretera de ladrillos amarillos discurría por el centro del prado hasta las puertas de una ciudad distante. Desde donde se hallaba, Alicia pudo ver que los altos muros de la ciudad eran de un verde brillante y las puertas estaban tachonadas de esmeraldas.

* * * *

Estado: Alicia (B1)

Alicia giró a la izquierda en la señal y siguió caminando por la sinuosa senda. Aún no había nada destacable a la vista. Dio la vuelta a una esquina y llegó a otra bifurcación del camino; esta vez el poste de señalización tenía dos brazos, marcados con «1» y «2». Giró a la derecha y prosiguió su camino.

La maleza entre los árboles se hizo más espesa y era difícil ver cualquier cosa algo alejada de la senda, aunque ésta era todavía bastante clara en tanto serpenteaba entre árboles muy densamente agrupados. Alicia rodeó una esquina y llegó de repente a un espacio abierto. En el centro de este claro se erigía un pequeño edificio con un empinado techo bituminoso y un pequeño campanario en un extremo. Las palabras «Escuela de Copenhague» estaban esculpidas en el dintel de piedra de la puerta.

«Éste debe de ser el lugar al que me dijeron que fuera —dijo Alicia para sí—. ¡Aunque no estoy segura de que desee ir a una escuela! Ya he pasado demasiado tiempo en la escuela. Pero tal vez una escuela de aquí sea completamente diferente a la que yo iba. ¡Entraré a verlo!» Abrió la puerta sin llamar y entró.

* * * *

Estado: Alicia (B2)

Alicia giró a la izquierda en la señal y siguió caminando por la sinuosa senda. Aún no había nada destacable a la vista. Dio la vuelta a una esquina y llegó a otra bifurcación del camino; esta vez el poste de señalización tenía dos brazos, marcados con «1» y «2». Giró a la izquierda y prosiguió su camino.

Un poco más adelante, la senda empezó a subir y Alicia ascendió por la ladera de una pequeña colina. Se detuvo unos minutos en la cima mirando hacia el campo de abajo en todas direcciones; y era un campo de lo más curioso. Había unos cuantos arroyuelos que lo

cruzaban de una a otra parte, y el terreno entre ellos estaba dividido en cuadrados mediante un cierto número de setos que iban de un arroyo a otro.

—Afirmo que está señalado justo como un tablero de ajedrez —dijo finalmente Alicia.

* * * *

—¡Ah!, entra, querida —la requirió suavemente una voz, y Alicia se dio cuenta de que había sido observada. Atravesó la puerta y miró en torno al aula. Era una sala muy grande rodeada por altas ventanas. Había filas de pupitres que ocupaban la mitad de la sala. En un extremo había un encerado y una gran mesa, detrás de la cual permanecía de pie el Maestro.

«Tiene todo el aspecto de una escuela común», admitió Alicia para sí en tanto se volvía a mirar a los niños de la clase. Encontró, sin embargo, que los pupitres no estaban ocupados por niños, sino por una más que notable selección de seres que se agrupaban en la parte delantera de la sala. Había una sirena con una larga y ondulante cabellera y una escamosa cola de pez. Se encontraba también un soldado uniformado que, visto más de cerca, resultaba estar hecho de estaño y una niñita harapienta con una bandeja llena de cerillas. Había un pato pequeño de espectacular fealdad y un hombre de aspecto altanero y porte majestuoso que por alguna razón se hallaba en paños menores.



«¿O lo está?», se preguntó Alicia. Al mirar otra vez le pareció verlo vistiendo prendas ricamente bordadas y una gruesa túnica de terciopelo. Sin embargo, cuando volvió a mirar, todo lo que pudo ver fue un hombre bastante corpulento en ropa interior.

—Hola, querida —dijo el Maestro, que era una figura de amable y familiar aspecto con pobladas cejas—. ¿Has venido a participar en nuestra discusión?

—Me temo que no sé cómo he llegado hasta aquí —dijo Alicia—. Me hallaba hace sólo un momento en varios lugares distintos, y no estoy en absoluto segura de por qué he acabado aquí y no en cualquier otro.

—Eso es debido a que hemos observado que tú estabas aquí, desde luego. Estabas en una superposición de estados cuánticos, pero, una vez que has sido observada estando aquí, tú estabas aquí, por supuesto. Evidentemente no fuiste observada en ningún otro lugar.

—¿Qué habría ocurrido si lo hubiera sido? —preguntó Alicia con curiosidad.

—Bueno, entonces tu conjunto de estados habría colapsado en ese otro. No estarías aquí, por supuesto, sino en la posición en que se hubiera observado que estabas.

—En realidad no veo cómo puede ser así —replicó Alicia, que de nuevo se sentía terriblemente confusa—. ¿Qué diferencia existe entre que yo fuera observada o no? Es seguro que he de estar en un sitio u otro con independencia de que alguien me vea.

—¡En absoluto! Después de todo, no puedes decir lo que sucede en cualquier sistema si no lo observas. Puede haber una gama completa de cosas que el sistema podría hacer, y sólo puede darse una probabilidad de que esté o no haciendo alguna de ellas en tanto en cuanto no sea observado. De hecho, el sistema se hallará en una superposición de estados correspondiente a todas las cosas que podría hacer. Ésa será la situación hasta que se mire para ver lo que está haciendo. En ese momento, por supuesto, se selecciona una posibilidad y el sistema estará haciendo sólo ésa.

La versión «ortodoxa» de la mecánica cuántica es la *Interpretación de Copenhague* (llamada así por el físico danés Niels Bohr, no por Hans Christian Andersen). Cuando en un sistema podrían suceder diferentes cosas, existirá una amplitud para cada una de ellas, y el estado del sistema viene dado por la suma, o superposición, de todas estas amplitudes.

Cuando se realice una observación, se encontrará un valor

que corresponde a una de estas amplitudes, y las amplitudes excluidas se anularán; este proceso se conoce como *reducción de las amplitudes*.

—¿Qué ocurre entonces con las otras cosas que estaba haciendo? —preguntó Alicia—, ¿simplemente desaparecen?

—Bien, hay más cosas que el sistema *puede* estar haciendo que cosas que *estaba* haciendo, pero sí —respondió el Maestro, sonriéndole—, lo has cogido exactamente. Todos los otros estados simplemente desaparecen. El *país de puede ser* se convierte en el *país de nunca fue*. En ese instante todos los demás estados cesan de ser reales. Se convierten, si lo prefieres, simplemente en sueños o fantasías, y el estado observado es el real. Esto se denomina *reducción de los estados cuánticos*. Te acostumbrarás enseguida a ello.

—¿Significa eso que cuando miras algo *puedes* escoger lo que verás? —preguntó Alicia con escepticismo.

—¡Oh, no!, no tienes ninguna elección en este asunto. Lo que con cierta seguridad vas a ver está determinado por las probabilidades de los diversos estados cuánticos. Lo que *realmente* ves es una cuestión de azar. No vas a elegir lo que sucederá; las amplitudes cuánticas sólo proporcionan las probabilidades de los diferentes resultados, pero no fijan lo que *sucederá*. Eso es puro azar y sólo se convierte en algo determinado cuando se hace una observación.

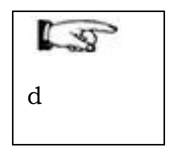
El Maestro dijo esto muy decididamente, aunque con tanta calma que Alicia tuvo que esforzarse para captar todo.

—Así que hacer una observación parece muy importante —musitó Alicia casi para sí misma—. Pero entonces ¿quién hace una observación? Evidentemente los electrones no son capaces de observar por ellos mismos al atravesar las rendijas en un experimento de interferencia, cuando parecen pasar a través de ambas rendijas. ¿O debería decir que hay amplitudes presentes para ambas rendijas? —se corrigió, copiando la forma de hablar que tanto había oído recientemente—. Según parece, no me observé propiamente cuando, justo hace un instante, me hallaba en una superposición de estados.

»De hecho —dijo Alicia precipitadamente, asaltada por un pensamiento repentino—, si la mecánica cuántica asegura que se debe hacer todo lo que se puede hacer, entonces seguramente se deben observar *todos* los resultados de cualquier medida que se realice. ¡Si el principio de superposición cuántico ha de operar en todas partes, no es posible realizar medidas en absoluto! Cualquier medida que se trate de hacer podría tener varios resultados posibles. Podría observarse *cualquiera* de esos resultados, y de acuerdo con sus reglas, si puede observarse *cualquiera* de ellos, tendrían que observarse *todos* ellos. Los resultados de la medida estarían todos presentes en una nueva versión de esa superposición de estados de la que habla usted. Nunca se podría observar nada realmente, o, más bien, nunca habría nada que no se pudiera observar.

Alicia hizo una pausa para respirar, completamente arrebatada por esta nueva idea, y notó que todos los presentes en la sala la miraban fijamente. Cuando paró, todos se agitaron algo incómodos.

—Desde luego has planteado una cuestión importante —dijo amablemente el Maestro—. Se conoce como el *problema de la medida* y es justamente el tema que hemos estado tratando en esta clase.



El maestro continuó:

—Es importante recordar que es un problema real. Debe existir una mezcla de amplitudes tal como la describimos para sistemas de uno o dos electrones, como en el experimento de la doble rendija que viste, ya que hay interferencia entre las amplitudes. No consiste simplemente en decir que el electrón puede estar en un estado, pues sucede que no se sabe qué estado es. Esa situación no produciría *ninguna* interferencia, de modo que nos vemos obligados a aceptar que, en algún sentido, cada electrón se halla en *todos* los estados. Creo que no formulas una cuestión apropiada al preguntar sobre lo que está haciendo realmente el electrón porque no hay ninguna manera de descubrirlo. Si trataras de comprobarlo, alterarías el sistema, así que estarías examinando algo diferente.

»Como acabas de señalar, aquí parece haber un problema. Los átomos y sistemas que contienen un número pequeño de partículas

siempre hacen todo lo que pueden hacer y nunca toman decisión alguna. Nosotros, por el contrario, siempre hacemos una cosa u otra y no observamos más de un resultado en una situación dada. Cada uno de los estudiantes ha preparado una breve charla sobre el problema de la medida. Ellos consideran en qué punto, si existe alguno, el comportamiento cuántico que permite que estén presentes todos los estados cesa de operar, de manera que pueden realizarse observaciones únicas y definidas. Tal vez te gustaría sentarte y escuchar sus presentaciones.

Esto le pareció a Alicia que era una buena oportunidad, así que se sentó en uno de los pupitres y se dispuso a prestar la máxima atención.

—La primera charla —anunció el Maestro, logrando apagar con su voz calmosa el murmullo expectante de los comentarios de los estudiantes— es la del Emperador.

El solemne caballero en elegante ropa interior que había observado Alicia al entrar en la clase se levantó y caminó hacia la parte delantera de la sala.



La Teoría del Emperador (mente sobre materia)

—Nuestra hipótesis —empezó, con una altiva mirada en torno a la sala— es que todo está en la mente.

»Las leyes que obedecen los sistemas cuánticos —prosiguió—, la descripción de los estados físicos mediante amplitudes y la

superposición de estas amplitudes cuando hay más de una condición posible; esas leyes se aplican a toda cosa material en el mundo. Decimos "toda cosa material" —repitió—, porque nuestra aseveración es que la mente consciente no experimenta tal superposición. El mundo físico está regido en todas sus fases por el comportamiento cuántico, y todo sistema puramente material, grande o pequeño, estará siempre en una combinación de estados, con una amplitud presente para todo lo que podría ser o podría haber sido. Sólo cuando la situación despierta la atención de la voluntad soberana de una mente consciente se hace una elección. Pues la mente es algo fuera de —o, en Nuestro caso, por encima de— las leyes del mundo cuántico.



No estamos ligados a la necesidad de hacer todo lo que podría hacerse; en lugar de ello Nosotros somos libres de hacer selecciones. Cuando Nosotros observamos algo, eso es observado; sabe que lo

hemos observado, el Universo sabe que Nosotros lo hemos observado y permanece después de ello en la condición en la que lo hemos observado. Es sólo Nuestro acto de observación lo que impone una forma única y definida al mundo.

No podemos hacer la selección de lo que Nosotros vamos a ver, pero cualquier cosa que Nosotros observemos se hace definitivamente real en ese momento.

Hizo una pausa y miró con autoridad alrededor de la sala una vez más. Alicia se sintió muy impresionada por su autoritaria exposición, a pesar de su ropa interior púrpura.

—Por ejemplo, cuando miramos Nuestra magnífica nueva vestimenta imperial, Nosotros observamos que estamos magníficamente ataviados. —Se miró y de pronto apareció vestido con espléndidas prendas de la cabeza a los pies. Su chaqueta y chaleco estaban cubiertos de finos bordados, y llevaba un ondeante manto de terciopelo guarnecido con armiño—. Ahora bien, es concebible que cuando Nuestra atención estaba desviada de Nuestra vestimenta, ésta podría haber sido menos tangiblemente real de lo que parece ser ahora, pero si eso hubiera sido así, ahora que Nosotros la hemos observado, todos ven que es del mejor corte, y eso es en realidad lo que es.

El Emperador levantó de nuevo la cabeza y miró hacia la clase. Alicia estaba intrigada al notar que, aunque su observación de las prendas de vestir había establecido completamente el rico aspecto de éstas, tan pronto como él había mirado a otro lado adquirieron

gradualmente un aspecto confuso una vez más y empezó a verse su elegante ropa interior marcada con sus iniciales.

—Ésa es entonces Nuestra tesis. El mundo material en su totalidad se rige ciertamente por las leyes de la mecánica cuántica, pero la mente humana se halla fuera del mundo material y no tiene tal restricción. Poseemos la capacidad de ver las cosas de modo único. No podemos escoger lo que veremos, pero lo que Nosotros vemos se hace realidad en el mundo, al menos mientras Nosotros lo observamos. Una vez hemos acabado Nuestra observación, entonces el mundo puede, por supuesto, empezar a entrar en su habitual conjunto de estados mezclados.

Se detuvo ahí y miró a su alrededor con aire satisfecho.

—Gracias por tan interesante charla —dijo el Maestro—; interesante en grado sumo. ¿Desea alguien hacer alguna pregunta?

Alicia descubrió que ella deseaba. Quizás después de todo el ambiente de la escuela la estaba afectando. Levantó la mano.

—Sí —dijo el Maestro, señalándola—, ¿qué es lo que te gustaría preguntar?

—Hay una cosa que no entiendo —dijo Alicia. (Esto no era del todo verdad, pues había muchas cosas que no entendía, y su número iba creciendo a un ritmo sumamente alarmante, pero había una cosa en particular sobre la que deseaba formular una pregunta.) Usted dice que el mundo se halla usualmente en esa extraña mezcla de estados diferentes, pero que se reduce a una situación única cuando sucede que usted, como mente consciente, lo mira. Yo supongo que cualquier persona es capaz de hacer que algo se

convierta en real de esa manera, ¿qué ocurre entonces con las mentes de las *otras* personas?

—No creemos comprender lo que quieres decir —replicó secamente el Emperador, pero el Maestro le interrumpió en ese punto.

—Quizás podría extenderme sobre la cuestión de la joven dama. Hablábamos antes acerca de electrones que pasan a través de dos rendijas. Supongamos que me dispusiera a hacer una foto que mostrara un electrón en el acto de pasar a través de una u otra rendija. Si sigo bien lo que dice, usted mantendría que como la foto podría mostrar que el electrón se hallaba en cualquiera de las rendijas, tendría que mostrar que se hallaba en ambas. La placa fotográfica no tiene mente consciente y sería incapaz de reducir la función de ondas, de manera que en la película estaría presente una superposición de dos imágenes diferentes. Supongamos ahora que yo hiciera varias copias de esta foto, por supuesto sin mirar ninguna de ellas. ¿Diría usted que en cada copia habría ahora una mezcla de imágenes diferentes, correspondiendo cada una de ellas a las diferentes rendijas que podría haber atravesado el electrón?

—Sí —replicó el Emperador cautelosamente—. Nosotros creemos que ése sería el caso.

—¿Si eso es así y si las fotos fueran enviadas a diferentes personas, entonces la primera que abriera su sobre y mirase la foto provocaría que una imagen de la mezcla se convirtiera en la real y todas las demás se desvanecieran?

De nuevo el Emperador asintió cautelosamente.

—Pero, en ese caso, las fotografías que hubieran recibido las otras personas tendrían que reducirse a la misma imagen en cada una de ellas, aunque estuvieran en ciudades diferentes separadas por muchos kilómetros. Sabemos por experiencia que las copias de una foto muestran lo mismo que la original, y si fue el acto en el que la primera persona miró una copia lo que causó que una posibilidad se hiciera real, presumiblemente este acto afectó al resto de las copias, puesto que éstas tienen que estar posteriormente de acuerdo con la primera. Así, pues, una persona que mirase una copia en una ciudad haría que todas las demás copias en otras ciudades alrededor del mundo cambiasen de repente para mostrar lo mismo. Ello se convertiría en una carrera muy peculiar en la que la primera persona que abriese el sobre fijaría las imágenes en el resto de las copias antes de que las otras personas hubiesen abierto sus sobres correspondientes. Creo que eso es lo que la joven dama quería decir —acabó.

—Naturalmente, tal consideración no presentaría ningún problema en Nuestro caso —respondió el Emperador—, puesto que nadie se atrevería a mirar tal fotografía antes de que Nosotros lo hubiéramos hecho primero. No obstante, vemos que tal situación podría darse entre gente de clases más bajas, y en ese caso la situación sería como usted la describe.

Alicia estaba tan sorprendida de que se aceptara ese manifiestamente ridículo argumento que no se dio cuenta de que el Emperador volvía a su pupitre y se levantaba la Sirenita. Dado que no podía permanecer de pie enfrente de la clase, pues no tenía pies,

se sentó en la mesa del Maestro meneando la cola. La atención de Alicia se centró en ella en cuanto comenzó a hablar.

La teoría de la Sirenita (muchos mundos)

—Como saben —comenzó con una voz fluida y musical—, yo soy una criatura de dos mundos. Vivo en el mar y me siento igualmente en casa en la tierra. Pero eso no es nada comparado con el número de mundos en que todos habitamos, pues somos todos ciudadanos de muchos, muchísimos mundos.

»El anterior orador nos dijo que las reglas cuánticas se aplican al mundo físico en su totalidad, esto es, dejando aparte las mentes de las personas que en él viven. Yo les digo que se aplican al mundo en su totalidad, a todo. La idea de la superposición de estados no tiene límite alguno. Cuando un observador u observadora contempla una superposición de estados cuánticos, se esperaría que viera todos los efectos que son apropiados a la selección de estados presente. Eso es lo que ciertamente sucede; un observador ve todos los resultados, o, más bien, se halla también en una superposición de diferentes estados, y cada estado del observador ha visto el resultado que corresponde a uno de los estados (del sistema) de la mezcla original. Simplemente, cada estado se extiende a fin de incluir al observador en el acto de ver ese estado concreto.

»Eso no es lo que nos *parece*, pero ello se debe a que los diferentes estados del observador no son conscientes uno de otro. Cuando un electrón atraviesa una pantalla con dos rendijas, puede pasar por la de la izquierda o por la de la derecha. Lo que se observa que sucede es puro azar. Tú podrías ver que el electrón ha pasado por la

izquierda, pero habrá otro *tú* que verá al electrón pasar por la derecha. En el momento en el que observas el electrón, tú te divides en dos versiones de ti mismo, una para cada resultado posible. Si esas dos versiones nunca vuelven a reunirse, cada una de ellas seguirá sin ser consciente en absoluto de la existencia de la otra. El mundo se ha dividido en dos mundos con versiones de ti ligeramente distintas en cada uno de ellos. Por supuesto, como esas diferentes versiones de ti hablarán entonces con otras personas, son también necesarias diferentes versiones de éstas, así que lo que se tiene es una división del Universo entero. En este caso se dividiría en dos, pero para una observación más compleja se dividiría en un mayor número de versiones.



—Pero seguramente eso sucedería con bastante frecuencia —no pudo resistirse a decir Alicia, interrumpiendo el flujo de la charla de la Sirena.

—Siempre sucede —replicó la Sirena con calma—. Siempre que se esté en una situación en donde una medida podría arrojar diferentes resultados, se *observarán* todos ellos y el mundo se fragmentará en el número apropiado de versiones.

»En general los mundos surgidos de la división permanecerán separados y divergirán sin haber sido jamás conscientes uno de otro, pero en ocasiones se reúnen en algún momento y producen efectos de interferencia. Es la presencia de esos efectos de interferencia entre los distintos estados lo que muestra que tales mundos pueden existir, y existen, juntos.

La Sirena cesó de hablar, se sentó y se puso a peinar la miríada de hilos de su larga cabellera que caían, uno al lado de otro pero de forma separada, por debajo de sus hombros.

—Ello debe de querer decir que existe una inmensidad de universos. Tendría que haber tantos como granos de arena hay en todas las playas de la tierra —protestó Alicia.

—¡Oh!, habría muchos más que eso. ¡Muchos más! —replicó la Sirena cerrando el asunto—. Muchos, muchos más —prosiguió como en sueños—. Muchos, muchos, muchos…

—Esa teoría —interrumpió el Maestro— tiene la ventaja de ser bastante económica en hipótesis, ¡pero es muy dilapidadora en universos!

Continuó llamando al siguiente orador. Era el Patito Feo, el cual tenía que permanecer encima de la mesa del Maestro a fin de que se le pudiera ver mejor.

La teoría del Patito Feo (todo es demasiado complicado)

El Patito comenzó su charla, y Alicia observó que, además de muy feo, parecía también estar muy enfadado. Su charla estaba tan llena de graznidos y farfulleos que era difícil hacerse una idea de lo que decía. Por lo que Alicia llegaba a distinguir, estaba diciendo que la superposición de diferentes estados sólo opera para sistemas bastante pequeños, de unos cuantos electrones o átomos. Dijo que basta argüir que los sistemas se hallan frecuentemente en una mezcla de estados porque ocurre la interferencia, puesto que un único estado no tendría nada con lo que pudiera interferir.



Arguyó además que no se sabe realmente que la interferencia suceda para objetos que contienen muchas partículas.

—La gente sabe que la interferencia, y por tanto la superposición de estados, puede ocurrir para grupos de unas cuantas partículas, de manera que se piensa que lo mismo ha de ser cierto para cosas complicadas, como los patos. Estaría fastidiado si creyera eso[4].

[4] Aquí el autor hace un juego de palabras intraducibie con *quacked* (de *quack*, «graznar») y *fucked*, expresión vulgar que significa literalmente «jodido». En los párrafos siguientes se

»Un patito contiene un montón de átomos —prosiguió— y antes de que cualquiera de los estados superpuestos pueda interferir, todos los átomos en cada estado por separado han de combinarse exactamente con el átomo apropiado en los otros estados. Hay tantos átomos que eso es muy poco probable. Todos los efectos se promediarán y no podría verse ningún resultado neto. Así, pues, ¿cómo podéis estar tan seguros de que los patitos están alguna vez en una superposición de estados? Contestadme a eso si sois tan listos. Toda esa superposición de estados está muy bien para unas cuantas partículas a la vez, pero deja de funcionar rápidamente para los patitos.

Prosiguió diciendo que él sabía condenadamente bien cuándo veía algo y cuándo no lo veía. Sabía que no se encontraba en ninguna superposición de estados, que estaba en uno solo, mala suerte. Así que cuando él cambiaba, continuó con fuerza, lo hacía realmente de un estado definido a otro. El cambio era irreversible, y no había manera de volver a combinarse con otros estados. Nada iba a interferir condenadamente con él, concluyó. En ese punto, su graznar se hizo tan extremo que Alicia no pudo entenderlo en absoluto y no se sorprendió demasiado cuando se puso tan furioso que se cayó de la mesa fuera de su vista.

Hubo una pausa y un momento de silencio que concluyó cuando un largo y elegante cuello surgió de detrás del pupitre, seguido de un cuerpo con un plumaje blanco como la nieve. Era un cisne.

---

continúa con esos juegos de palabras (para ilustrar el lenguaje ordinario del Patito Feo) que en lengua española no tienen gracia porque no significan nada, así que no se traducirán literalmente. *(N. del T.)*

—¡Qué bello! —exclamó Alicia—. ¿Puedo acariciarte?

El cisne silbó furiosamente e hizo palmotear amenazadoramente sus alas. Alicia llegó a la conclusión de que, aunque el cambio era ciertamente irreversible, no parecía haber modificado mucho su temperamento.

En ese momento se produjo un ruido en la parte trasera de la clase, y Alicia oyó gritar a alguien:

—¡Alto con esta charada, todos están equivocados!

Miró hacia allá y vio una alta figura andando furiosamente a zancadas entre los pupitres. Era el Mecánico Clásico. Su avance estaba considerablemente limitado por el hecho de llevar consigo una máquina, muy parecida a los *pinball* que Alicia había visto en los cafés. (Bueno, en realidad se ven más frecuentemente en los bares, pero, claro está, Alicia era demasiado joven para haberlos visto allí.)

La teoría del Mecánico Clásico (ruedas dentro de ruedas)

El Mecánico Clásico se dirigió a la parte delantera de la sala y dejó su máquina junto a la mesa del Maestro; una etiqueta ponía «interceptor de electrones». Tenía la forma de una mesa inclinada, con dos rendijas arriba a través de las cuales se disparaban las partículas y una fila de «bolsillos» a lo largo de la parte inferior que estaban marcados alternativamente con «gana» y «no gana». La superficie de la mesa, aunque pintada brillantemente, no tenía, sin embargo, el usual conjunto de obstáculos y cachivaches que Alicia había visto antes en ese tipo de máquinas.

—Están todos engañándose a sí mismos —proclamó firmemente el Mecánico Clásico—; he observado con cuidado este aparato, que es básicamente un dispositivo normal de doble rendija para interferencia de electrones, y creo saber lo que realmente sucede.

Alicia pudo ver que, aparte de su llamativa decoración, el aparato era ciertamente una versión más pequeña del experimento que había visto en la habitación *gedanken* del Mecánico. Éste mostró rápidamente el funcionamiento de la máquina disparando una ráfaga de electrones a través de las dos rendijas. Al menos eso es lo que supuso Alicia, porque ésas eran las únicas aberturas presentes, aunque no fue capaz de ver dónde estaban realmente los electrones hasta que se registró la llegada de éstos a lo largo de la parte inferior de la mesa. Como ella esperaba, los electrones se apilaron en una serie de montones, con huecos entre ellos, donde se habían detectado muy pocos electrones. Alicia se intrigó al ver que esos huecos en el patrón de interferencia se correspondían estrechamente con los bolsillos marcados «gana».

—Ven que la interferencia se produce y arguyen que eso muestra que los electrones han pasado de alguna manera a través de ambas rendijas, de modo que la combinación de amplitudes de las dos rendijas produce el patrón de interferencia que vemos. Yo les digo ahora que cada uno de los electrones pasa de hecho por una sola rendija, de manera perfectamente razonable. ¡La interferencia se debe a *variables ocultas*!

A Alicia le resultó muy difícil seguir lo que sucedió entonces. Lo mejor que podía decir fue que después el Mecánico Clásico pareció

sacar de la mesa de juego una sobrecubierta que aparentemente no había estado allí. Fuera como fuera, el caso es que vio que la superficie de la mesa estaba cubierta con un patrón de profundas ranuras y crestas que salían de las dos ranuras.

—¡He ahí las variables ocultas! —exclamó el Mecánico.

—No están muy ocultas —señaló Alicia, mirando críticamente la complicada superficie ahora revelada.

—Mi aseveración —comenzó diciendo el Mecánico Clásico, ignorando con toda intención el comentario de Alicia— es que los electrones y otras partículas se comportan de modo racional y ciertamente clásico, casi completamente igual que las partículas que me son familiares en el Mundo Clásico. La única diferencia es que aquí, además de la fuerza que actúa sobre las partículas, éstas se ven afectadas por una *fuerza cuántica* especial, u *onda piloto*. Esto causa los extraños efectos que ustedes interpretan como debidos a la interferencia. En mi demostración con la máquina de electrones presente, cada electrón entra realmente por una u otra rendija, y después se mueve por la mesa de manera respetable y predecible. Cualquier aleatoriedad presente en el dispositivo procede de las diferentes posiciones y velocidades que tienen los electrones inicialmente.



Cuando los electrones crucen las ranuras que ven aquí en el potencial cuántico, la fuerza cuántica los desviará, como una rueda de bicicleta atrapada en un raíl de tranvía, así que la mayoría de los electrones acabarán en grupos. Esto produce los, así llamados, «efectos de interferencia».

—Muy bien —dijo el Maestro—, ésa es una *interesante* teoría, muy interesante ciertamente. No obstante, si no le importa que lo diga así, usted parece haber quitado de en medio las dificultades que le planteaba el comportamiento de los electrones a expensas de un comportamiento muy peculiar de su *potencial cuántico.*

»Como su fuerza cuántica ha de producir los efectos que nosotros decimos que son debidos a la interferencia, ésta debe verse afectada por cosas que suceden en lugares muy diferentes. Si se abriera una tercera rendija en su mesa, las fuerzas cuánticas sobre las partículas cambiarían, incluso aunque ninguna de ellas hubiera pasado por esa rendija. Ello debe ser así porque la interferencia en

el caso de tres rendijas es diferente que en el de dos, y su fuerza tiene que reproducir todos esos efectos de interferencia que sabemos que ocurren. Además, su potencial cuántico, o red de fuerzas cuánticas, ha de ser ciertamente muy complicado. En esta teoría no hay nada parecido a la reducción de las funciones de onda que aparece en la teoría cuántica normal, de modo que su potencial ha de estar afectado por todas las posibilidades de todo lo que podría haber sucedido. En eso, es como la teoría de los "muchos mundos". En su teoría dice usted que lo que se observe dependerá de cómo hayan viajado las partículas una vez afectadas por la onda piloto, pero esta misma onda piloto conservará información de todas las cosas que podrían haber sucedido y que no puede eliminarse. Su onda tendría que ser increíblemente complicada, como la suma de *todos* los mundos en la teoría de los "muchos mundos", aunque la mayor parte de ella no afecte a ninguna partícula la mayoría del tiempo.

»En su teoría la onda piloto influye sobre lo que hacen las partículas, pero la manera en que se mueven de hecho las partículas individualmente no tiene ninguna influencia sobre la onda. Ésta depende de lo que las partículas *podrían* haber hecho.

»No existe simetría de acción y reacción entre las partículas y la onda piloto. En su calidad de Mecánico Clásico, esto debería preocuparle. ¿No desearía contradecir la ley de Newton que afirma que acción y reacción son siempre iguales, verdad?

En ese instante el Mecánico Cuántico, que había seguido al Mecánico Clásico hasta la sala pero permanecía en silencio en el fondo, se adelantó y tomó a su colega por el brazo.

—Ven —le dijo—. Seguramente no desearás verte involucrado en una acusación de herejía dentro de la mecánica clásica por dudar de las leyes de Newton. Toda esta discusión académica sobre lo que los electrones realmente pueden o no pueden hacer no es de nuestro interés. Nosotros somos mecánicos. Como tal, lo que me interesa fundamentalmente es que la mecánica cuántica funciona de verdad y funciona bien. Cuando calculo la amplitud para algún proceso, ésta me dice lo que probablemente va a suceder; me da las probabilidades de los diferentes sucesos y lo hace precisa y fehacientemente. Mi tarea no consiste en preocuparme acerca de lo que hacen los electrones cuando no los miro, mientras pueda decir lo que probablemente van a hacer cuando los miro.

Existen varias «respuestas» al problema de la medida, pero ninguna de ellas es universalmente aceptada.

La mecánica cuántica se usa normalmente, en la práctica, para calcular las amplitudes y por tanto las diversas probabilidades para algún sistema físico; se utilizan, por tanto, para predecir el comportamiento de *conjuntos* grandes de sistemas atómicos individuales, sin preocuparse demasiado de lo que le sucede a un único sistema. Los resultados para los conjuntos pueden compararse con las

medidas, de nuevo sin preocuparse demasiado acerca de cómo podrían haber tenido lugar los procesos de medida.

La respuesta práctica a este problema es «cierra los ojos y calcula». La interpretación de la mecánica cuántica puede ser ardua, pero es innegable que funciona muy bien.

Dejó a su amansado colega tranquilamente a un lado; después se volvió hacia Alicia y le preguntó:

—¿Has aprendido tanto como deseabas saber sobre observadores y medidas?

—Bueno —comenzó Alicia—; para decirle la verdad, me siento más confusa de lo que estaba cuando vine aquí.

—Perfecto —interrumpió enfáticamente el Mecánico Cuántico—. Eso pensaba. Has aprendido todo lo que deseas aprender. Acompáñame ahora a ver algunos de los resultados de la teoría cuántica. Permíteme mostrarte algunas de las características del País de los Cuantos.

Capítulo 5
La Academia Fermi-Bose

Alicia fue con el Mecánico Cuántico por el camino que los alejaba de la escuela. Poco a poco el camino se fue haciendo más ancho hasta que acabó siendo una carretera bien pavimentada.

—Creo que la cosa más curiosa que me ha mostrado —señaló Alicia— es la manera como obtuvo usted esos efectos de interferencia aunque sólo estuviera presente un electrón. ¿Es cierto que no existe ninguna diferencia entre que haya muchos electrones o sólo uno?

—Es realmente verdadero que puede observarse interferencia tanto si se tienen muchos electrones como si se cuenta con uno solo cada vez. No obstante, no puede decirse que no exista ninguna diferencia entre las dos situaciones.



Hay algunos efectos que sólo pueden observarse cuando se tienen muchos electrones. Considera el principio de Pauli, por ejemplo...

—¡Oh!, ya he oído algo acerca de eso —interrumpió Alicia—. Oí a los electrones hablar de él cuando llegué aquí. ¿Podría decirme lo que es, por favor?

—Es una regla que se aplica cuando se tiene un conjunto de partículas completamente idénticas en todos los sentidos. Si deseas saber algo más sobre esto, es mejor que hagamos una parada aquí, ya que estamos cerca de donde hay gente muy experta en el comportamiento de sistemas de muchas partículas.

Al oír eso, Alicia miró a su alrededor y se dio cuenta de que mientras hablaban habían llegado a un alto muro de piedra situado en un lado de la carretera. Inmediatamente opuesto a él había una amplia entrada. Unas impresionantes puertas de hierro permanecían abiertas entre sólidas columnas de piedra con un escudo de armas pintado en el centro de cada una de ellas. A la derecha de la entrada, bien visible encima del muro, Alicia advirtió la presencia de un tablón de madera con el siguiente anuncio:

ACADEMIA FERMI-BOSE

PARA ELECTRONES Y FOTONES

En el centro de la entrada permanecía una imponente figura, un hombre grande y bien constituido que aparentaba aún más solidez debido al traje académico y al birrete que llevaba. Su cara redonda y

encarnada se adornaba con un espeso mostacho y largas patillas. Firmemente ajustado a un ojo, llevaba un monóculo sujeto por una ancha cinta negra.

—Ése es el Director —le susurró el Mecánico a Alicia en el oído.

—¿Quiere usted decir el principio de Pauli[5]? —preguntó bastante impetuosamente Alicia, a quien la súbita aparición había pillado desprevenida.

—No, no —susurró el Mecánico—, él es el Principal Director de la Academia. Aunque por supuesto el principio de Pauli es el principal principio de la Academia, él es el Director Principal de ésta. —Alicia deseó no haber preguntado nada.

Cruzaron la carretera hasta donde estaba ese imponente personaje.

—Disculpe, señor —comenzó el Mecánico—. ¿Sería usted tan amable de decirle a mi joven amiga aquí algo acerca de los sistemas de muchas partículas?

—Desde luego, desde luego —exclamó el Director con voz tonante—. No tenemos escasez de partículas aquí, claro que no. Estaré encantado de enseñarte todo esto.

Se dio la vuelta agitando su toga y los condujo a la Academia. A lo largo de la calzada, Alicia vio unas pequeñas figuras moviéndose hacia dentro y hacia fuera entre los matorrales. En un instante una figura miró por encima de un arbusto y les hizo una mueca. Al menos eso pensó Alicia. Como solía ocurrir, era muy difícil distinguir los detalles.

---

[5] De nuevo el autor hace un juego de palabras, ahora entre *Principal* («director») *y principie* («principio»), cuya pronunciación en inglés es prácticamente igual. (*N. del T.*)

—No le hagáis caso —refunfuñó el Director—. Es sólo Electrón Menor.

Llegaron a la puerta de la Academia, que ocupaba una solemne casa antigua de estilo vagamente Tudor. Sin detenerse, el Director los condujo a través de la puerta principal a un vestíbulo abovedado, para subir luego por una amplia escalera labrada en madera. Mientras caminaba por el edificio, Alicia pudo ver pequeñas figuras escondiéndose tras las columnas, entrando y saliendo rápidamente de las habitaciones y escapándose por pasillos laterales cuando ellos se les acercaban.

—No le hagáis caso —hizo notar de nuevo el Director—. Es sólo Electrón Menor. ¡Las partículas son partículas!

—Pero no puede ser Electrón Menor si lo vimos en la calzada —protestó Alicia—. Con seguridad no puede ser la misma partícula en los dos sitios. ¿Estamos hablando de algo similar a cómo se las arregla un electrón para pasar a través de ambas rendijas en su experimento de la doble rendija? —preguntó al Mecánico Cuántico.

—No, no es eso; aquí tienen muchos electrones. Pero ¿sabes?, los electrones son todos exactamente iguales. Son completamente idénticos entre sí. No hay manera de distinguirlos, así que *todos* son naturalmente Electrón Menor.

—Cierto —confirmó el Director enfáticamente al tiempo que los conducía a su estudio—. Y eso es un problema. Probablemente conoces la dificultad que representa para los maestros el tener dos gemelos idénticos en su escuela y ser incapaces de distinguirlos. Pues bien, yo tengo aquí centenares de partículas idénticas. Esto

hace que la comprobación del registro sea una auténtica pesadilla. Puedo asegurártelo.

»Para los electrones la cosa no es tan mala —prosiguió—. Simplemente los contamos y vemos si el total es correcto. Al menos el *número* de electrones se conserva, así que sabemos cuántos hemos de tener, pero ni siquiera eso funciona para los fotones. Los fotones son bosones, de modo que su número no se conserva, ¿sabes? Podemos empezar una clase con treinta, digamos, y tener cincuenta o más al final de la misma. O que el número descienda a menos de veinte; es difícil de predecir. Esto hace todo muy difícil para el personal.

Alicia había descubierto una nueva palabra en ese comentario.

—¿Cree que podría explicarme eso? —preguntó esperanzadamente—. ¿Podría decirme, por favor, qué es un bosón?

El director se sonrojó aún más de lo que lo había hecho antes y habló al Mecánico.

—Creo que sería mejor que la llevara a la lección de Aspectos de la Simetría para principiantes, ¿no? Allí le explicarían todo acerca de bosones y fermiones.

—Tiene usted razón —repuso el Mecánico—. Ven, Alicia, creo que puedo recordar el camino.

Caminaron a lo largo de un pasillo hasta una clase, en la que entraron justo cuando estaba empezando una lección.

—Atención, por favor —dijo el maestro—. Como sabéis bien, todos vosotros, electrones, sois idénticos unos a otros, y lo mismo vosotros, fotones. Esto significa que nadie puede notar si dos de

vosotros cualquiera habéis intercambiado los sitios. Hasta donde cualquier observador sería capaz de decir, *podríais* haber intercambiado los sitios y desde luego lo habéis hecho hasta cierto punto. Todos sabéis que tenéis una función de ondas asociada, o amplitud, y que esta amplitud será una superposición de todas las cosas que *podríais* estar haciendo. Si no hay manera de decir las cosas que estáis haciendo, entonces, como sabéis, estáis haciendo todas ellas, o en cualquier caso tenéis una *amplitud* para todas ellas. Así que ya veis, para cualquier grupo de vosotros resulta imposible decir cuándo dos de vosotros habéis intercambiado vuestros sitios, y esto significa que vuestra función de ondas total será una superposición de todas las amplitudes en las cuales se han intercambiado diferentes pares. Espero que hayáis tomado nota de esto.



»Ahora bien, la probabilidad de observar cualquier cosa viene dada por el *cuadrado* de vuestra función de onda, es decir, la función de onda multiplicada por sí misma. Como sois completamente idénticos, es evidente que si dos cualesquiera de vosotros intercambiáis vuestros sitios, no puede haber ninguna diferencia observable, así que el cuadrado de vuestra función de onda no puede cambiar. A primera vista es como si nada en absoluto pudiera cambiar. ¿Sabe alguien qué podría cambiar?

Uno de los electrones levantó la mano, o al menos Alicia supuso que eso es lo que ocurrió. No era capaz de ver nada claramente.

—Disculpe, señor, el signo podría cambiar.

—Muy bien, ésa es una excelente respuesta. Pondría una buena nota en tu expediente por haber contestado tan bien, si no fuera porque, desgraciadamente, no puedo distinguirte de los demás. En efecto, como sabéis, vuestras amplitudes no tienen por qué ser positivas. Pueden ser positivas o negativas, de manera que dos amplitudes pueden anularse entre sí cuando se produce interferencia. Esto quiere decir que hay dos casos en los que el cuadrado de vuestra amplitud no cambiaría. Puede ser que la amplitud no cambie en absoluto cuando dos de vosotros intercambiáis vuestros sitios. En tal caso, las partículas son bosones, como vosotros, fotones. Sin embargo, existe otra posibilidad. Cuando se hace tal intercambio, la amplitud puede *invertirse*, pasar de positiva a negativa o viceversa. En tal caso, el cuadrado de la amplitud sigue siendo positivo y la distribución de probabilidad no cambia, porque al multiplicar la amplitud por sí misma tienen lugar *dos* cambios de signo, con lo que no hay cambio en absoluto. Eso es lo que pasa con los fermiones, como vosotros, electrones. Todas las partículas pertenecen a una de estas dos clases: son fermiones o bosones.

»Podéis ahora pensar que no importa mucho que vuestra amplitud cambie o no de signo puesto que la distribución de probabilidad no cambia, pero de hecho esto es verdaderamente muy importante, en particular para los fermiones. El punto crucial es que si dos

cualesquiera de vosotros os halláis exactamente en el mismo estado —esto es, en el mismo sitio y haciendo las mismas cosas—, entonces, si intercambiáis los sitios, no es sólo un cambio inobservable, sino que realmente no ha habido *en absoluto cambio alguno*. En este caso *no* puede cambiar la distribución de probabilidad *ni tampoco* la amplitud. Esto no presenta ningún problema para los bosones, pero para los fermiones, que siempre han de cambiar de signo su amplitud, tal situación no está permitida. Para estas partículas rige el principio de exclusión de Pauli, que dice que dos fermiones idénticos nunca pueden estar haciendo lo mismo; han de hallarse en estados diferentes.



»Como he dicho, en el caso de los bosones no hay problema. Sus amplitudes no han de cambiar en absoluto cuando dos de ellos intercambian sus sitios, así que pueden encontrarse en el mismo estado. Incluso puedo ir más allá; no sólo pueden hallarse en el mismo estado, sino que de hecho eso les *agrada*. Normalmente, cuando se tiene una superposición de estados diferentes y se eleva la amplitud al cuadrado para obtener la probabilidad de observación, se toman cuadrados de los estados individuales de la mezcla separadamente y todos ellos contribuyen por igual a la probabilidad total. Si se tienen dos bosones en el mismo estado, cuando se hace el cuadrado de los dos se obtienen cuatro. Los dos han contribuido no el doble sino el cuádruplo de uno. Si se tuvieran

tres partículas en el mismo estado, éstas contribuirían incluso más. La probabilidad es mucho mayor cuando hay un elevado número de bosones en un estado, de manera que tienden a colocarse en el mismo estado si hay alguna posibilidad de ello. Eso se conoce como la *condensación de Bose*.

»Así que ahí tenéis la diferencia entre bosones y fermiones. Los fermiones son muy individualistas, no hay dos de ellos que hagan exactamente la misma cosa, mientras que los bosones son muy gregarios. Les gusta ir por ahí en pandillas y que cada uno de ellos se comporte exactamente igual que los otros. Como veréis más tarde, es este comportamiento y la interacción entre ambos tipos de partículas lo que determina la naturaleza del mundo. En gran manera vosotros sois los dirigentes del mundo.

En ese momento el Mecánico Cuántico condujo a Alicia fuera de la clase.

—Aquí lo tienes —dijo—. Ése es el principio de Pauli. Establece que ningún par de fermiones del mismo tipo puede jamás hacer la misma cosa, así que puede haber uno y sólo uno en cada estado. El principio se aplica a fermiones de cualquier tipo, pero no a bosones. Esto significa, entre otras cosas, que el número de fermiones debe conservarse. Los fermiones no pueden aparecer y desaparecer de una manera casual.

—¡Yo pensaría que no! —dijo Alicia—. Eso sería ridículo.

—No creo que puedas decir eso, ¿sabes?, porque los bosones aparecen y desaparecen. Su número no se conserva en absoluto. Puedes argüir que el número de fermiones debe estar bien definido

si hay uno y sólo uno en cada estado, puesto que un número concreto de estados ocupados implica que existe ese mismo número de fermiones para ocuparlos. El argumento no se aplica a los bosones, puesto que puede haber tantos como se quiera en cualquier estado. En la práctica el número de bosones no es en absoluto constante.

»Si miras por esta ventana —dijo de repente mientras iban andando—, podrás ver la diferencia entre bosones y fermiones perfectamente.

Alicia miró atentamente por la ventana y vio un grupo de electrones y fotones que estaban haciendo la instrucción en el campo de la Academia. Los fotones lo hacían bastante bien, girando y dando media vuelta en perfecto sincronismo, sin diferencias entre ellos. El grupo de electrones, sin embargo, se comportaba de una manera que llevaba manifiestamente a la desesperación al sargento instructor. Algunos marchaban hacia adelante, pero a diferentes velocidades. Otros marchaban a izquierda o derecha, o incluso hacia atrás. Unos cuantos daban saltos o hacían el pino, y uno estaba tumbado boca arriba y miraba el cielo.

—Se halla en el estado fundamental —dijo el Mecánico mirando por encima de los hombros de Alicia—. Presumo que los otros electrones desearían poder reunirse con él, pero sólo a uno de ellos le es permitido estar allí. A no ser que el otro tuviera una dirección de espín opuesta, por supuesto; eso haría que fueran suficientemente distintos. Puedes ver claramente la diferencia entre bosones y fermiones. Los fotones son bosones, de modo que les resulta fácil

hacer todos lo mismo. Verdaderamente, les gusta ser todos iguales, así que son muy buenos marcando el paso. Los electrones, por el contrario, son fermiones, y entonces el principio de exclusión de Pauli impide que dos de ellos se encuentren en el mismo estado. Cualquiera de ellos tiene que comportarse de manera diferente de los demás.

—Suele usted hablar frecuentemente de electrones que se hallan en estados —hizo notar Alicia—. ¿Me podría explicar, por favor, qué es un estado?

—De nuevo, lo mejor para ti será que te sientes en una de las clases. La Academia enseña a líderes mundiales, ya que es la interacción de electrones y fotones lo que rige el mundo físico en general. Si han de ser dirigentes mundiales, tienen que ir naturalmente a clases para estadistas. Ven conmigo a ver una.

Condujo a Alicia hasta un extenso y bajo edificio en la parte posterior de la Academia. Cuando entraron, Alicia pudo ver que era una especie de taller. Unos cuantos electrones estaban trabajando en diferentes bancos. Alicia fue a observar a un grupo ocupado en levantar una serie de vallas alrededor del banco; pudo ver que había diversas estructuras sobre el banco y que, cuando los estudiantes movían las vallas alrededor de éste, todas esas estructuras cambiaban.

—¿Qué están haciendo? —preguntó Alicia a su acompañante.

—Están disponiendo las condiciones de contorno para los estados. Los estados están altamente controlados por las ligaduras que los mantienen dentro. En general, lo que puede hacerse está regido por

lo que no puede hacerse, y las restricciones sirven para definir los estados posibles. Es muy similar a las notas que pueden obtenerse de un tubo de órgano. Con un tubo de longitud determinada puede producirse sólo un número limitado de notas. Si se cambia la longitud del tubo, se cambiarán las notas. Los estados cuánticos vienen dados por la amplitud o la función de onda que puede tener el sistema, y ésta es muy parecida a la onda sonora en un tubo de órgano.

Un estado describe la condición de un sistema físico. Es el concepto básico en la teoría cuántica; la mejor descripción que puede proporcionarse del mundo real. En general la amplitud para un estado da la probabilidad para los diversos resultados posibles de cualquier observación. Para algunos estados puede haber sólo un resultado posible de una medida concreta. Cuando un sistema se encuentra en uno de esos llamados estados estacionarios, cualquier medida de la magnitud física correspondiente dará un solo resultado posible. Medidas repetidas darán todas las veces el mismo resultado. De ahí el nombre estado estacionario, también llamado «autoestado» (del alemán *eigenstate*).

»Como ya has descubierto, no puede decirse usualmente lo que está realmente haciendo un electrón, porque, si se le observa, para comprobarlo se elegirá una amplitud en particular y las amplitudes

se reducirán a esa sola. La única ocasión en que se puede tener seguridad acerca de un electrón es cuando éste tiene una única amplitud y no una superposición de ellas y cuando la observación puede arrojar sólo un valor. En ese caso la probabilidad de obtener ese resultado experimentalmente es del cien por cien, y la de cualquier otro resultado es cero; por tanto, éste no se dará. Cuando se realiza la observación, se ve el resultado esperado. En tal caso, la reducción de la amplitud a la del resultado esperado no causa ninguna diferencia en absoluto, ya que se estaba realmente en ese estado. La observación no cambia el estado, y éste se denomina *estado estacionario.* En esta clase los electrones están construyendo estados estacionarios.

Alicia se desplazó alrededor de la mesa, mirando los estados que estaban armando los electrones; le parecían varias cajas, ocho en total. Había una muy grande, otra algo más pequeña que ésta y otras seis pequeñas de tamaño muy parecido. Rodeó una esquina de la mesa y se sorprendió al ver que los estados habían cambiado por completo. Ahora tenían la apariencia de estantes, como si fueran para pasteles, sobre altos pedestales. Había dos mucho más anchos que los otros; cuatro tenían la misma anchura, pero con pedestales sucesivamente más altos, y dos pequeños. Dobló rápidamente otra esquina de la mesa y vio que el centro de la mesa estaba ocupado por un gran tablero en el que había sujetos varios ganchos para colgar ropa. Había dos filas de tres, y, en solitario, uno encima y otro debajo de éstas.

Existen ciertas magnitudes que no pueden compartir el mismo estado estacionario; la posición y el momento son dos ejemplos. Si se tiene un autoestado que proporciona un valor definido para la posición de una partícula, una medida de su momento podría dar cualquier resultado. Esto conduce a las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. Si se tiene una mezcla de estados que corresponden a diferentes valores de la posición, una medida de ésta podría dar uno de los valores apropiados. La posición se ha hecho «incierta», aunque ahora la dispersión de los valores del momento puede reducirse.

Esa dispersión no se debe a una técnica pobre de medida, sino que es inherente al estado físico. El valor indefinido de alguna magnitud física que puede ser inherente a un estado concreto permite efectos tales como la penetración de barreras, el intercambio de partículas pesadas en los núcleos de fotones en interacciones eléctricas y la existencia de partículas virtuales en general. Lo relativo a las partículas virtuales y al intercambio de partículas se discutirá en los capítulos 6 y 8.

—Dios mío, ¿qué está pasando? —preguntó a su acompañante—. Veo los estados absolutamente diferentes cuando los miro desde distintas direcciones.

—Así es, desde luego —replicó el Mecánico Cuántico—. Estás viendo diferentes *representaciones* de los estados. La naturaleza de un

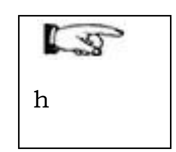
estado depende de cómo se observa. La misma existencia de un estado estacionario descansa sobre alguna observación para la cual siempre arroja un resultado definido, pero un estado no puede dar resultados definidos para *todas* las observaciones posibles. Por ejemplo, las relaciones de Heisenberg impiden ver el momento y la posición de un electrón a la vez, de manera que un estado estacionario para una observación no lo será para la otra. Las observaciones empleadas para describir un estado se conocen como la representación de éste.

»La naturaleza de un estado puede ser muy diferente, dependiendo de cómo se observa. De hecho, la misma identidad de los diferentes estados puede cambiar. Los estados que se ven en una representación pueden no ser los mismos que los de otra representación. Como habrás notado ahora mismo, la única cosa que permanece constante es el *número* de estados. Si puede ponerse uno de los electrones en cada estado, ha de tenerse siempre el mismo número de estados para contenerlos a todos, incluso aunque los estados individuales puedan haber cambiado.

—Eso me parece muy vago —protestó Alicia—. Da la impresión de que no se puede estar del todo seguro de lo que realmente existe.

—¡Cierto! —replicó el Mecánico alegremente—. ¿No te habías dado cuenta? Podemos hablar con toda confianza de *observaciones*, pero qué existe realmente para ser observado es harina de otro costal. No obstante, ven. Es la hora de la asamblea vespertina de la Academia. La encontrarás muy interesante.

El mecánico la condujo de vuelta al edificio principal y la hizo pasar a través del vestíbulo a una enorme sala con un alto techo abovedado. El extenso suelo enlosado estaba totalmente cubierto por una muchedumbre de electrones densamente apiñados. Por encima, un ancho balcón adornado se extendía a lo largo del contorno del amplio vestíbulo, y sobre él Alicia pudo ver las vagas figuras distantes de unos cuantos electrones dirigiéndose apresuradamente hacia una salida. Había sólo un pequeño espacio libre en el suelo cerca de la puerta por donde habían entrado, y un electrón que los había seguido corrió hacia allí y se detuvo inmediatamente al llegar, rodeado por la densa muchedumbre, de modo que ya no era posible moverse hacia ningún lado.



—¿Por qué está tan abarrotado este lugar? —exclamó Alicia, superada por la magnitud de la escena que tenía ante sus ojos.

—Éste es el nivel de valencia —respondió uno de los serviciales electrones—. Todos los espacios en el nivel de valencia están ocupados porque dicho nivel está siempre lleno de electrones. Ninguno de nosotros puede moverse en absoluto, ya que no hay estados libres a los que moverse, ¿te das cuenta?

—Eso es terrible —exclamó Alicia—. ¿Cómo puede moverse cualquiera de vosotros por el suelo para salir si está tan abarrotado?

—No podemos —dijo el electrón con alegre resignación—. Pero tú puedes si lo deseas. Puedes ir a cualquier lugar en el suelo porque aquí no hay ninguna otra Alicia, así que hay muchos estados Alicia libres para moverte en ellos. No tendrás ningún problema de exclusión de Pauli en absoluto.

Esto aún le parecía muy extraño a Alicia, pero trató de abrirse camino a través de la abigarrada multitud de electrones y advirtió, exactamente igual que cuando había tratado antes de entrar en el compartimento ocupado del tren, que de alguna manera podía moverse sin ningún impedimento.

Alicia se abrió camino a través de la muchedumbre de electrones hacia una tribuna erigida en el extremo del vestíbulo. En ella estaba el Director, tan impresionante como siempre con su toga y su birrete. Al acercarse, Alicia pudo oír su voz grave resonando en la abarrotada sala.

—Sé que hoy habéis tenido un día muy ocupado, pero confío en que no sea necesario que os recuerde el importante papel que debéis estar preparados para desempeñar en el mundo. Vosotros, electrones, ocupando cada uno su sitio en el estado apropiado, formáis la auténtica estructura de todo lo que conocemos. Algunos de vosotros estaréis confinados en átomos y tendréis que trabajar en vuestros diversos niveles, controlando todos los detalles de los procesos químicos. Otros podéis encontrar vuestro lugar en un sólido cristalino. Allí os encontraréis relativamente libres, sin ligaros a ningún átomo en particular, y podréis moveros siempre que el principio de Pauli y vuestros colegas electrones lo permitan. Podéis

estar en una banda de conducción, donde podéis moveros libremente, y entonces vuestra tarea será la de desplazaros con presteza transportando vuestras cargas eléctricas como parte de una corriente eléctrica. Por otra parte, podéis estar en una banda de valencia dentro de un sólido. Quizás os sintáis como atrapados allí, ya que no habrá estados libres para que entréis en ellos. No os desaniméis. No todo electrón puede hallarse en el estado de energía más alta, y recordad que también han de ocuparse los niveles más bajos.



»En cuanto a vosotros, fotones, sois los movedores y agitadores. Abandonados a sí mismos, los electrones permanecerían con complacencia en sus estados propios y nunca pasaría nada. Vuestra misión es interactuar con los electrones en todo momento y producir las transiciones entre estados, los cambios que hacen que ocurran cosas.

En este punto del discurso del Director, Alicia advirtió las brillantes formas de los fotones moviéndose rápidamente entre la muchedumbre de electrones y los destellos esporádicos en diversas partes de la sala. Se dio la vuelta para ver qué pasaba. Le resultaba difícil ver a lo lejos porque estaba rodeada por muchos electrones.

—Esto es realmente fatal —no pudo por menos que exclamar Alicia al mirar todas las figuras cautivas, mantenidas en una posición fija

por la presión en torno a ellas—. ¿No hay manera de que alguno pueda moverse?

—Sólo si fuéramos excitados al nivel más alto —respondió una voz. Alicia no pudo ver quién había hablado.

«Pero no importa realmente —pensó—. Como son todos el mismo, debe de haber hablado el mismo de siempre, supongo.»

Justo entonces se produjo cerca un destello y Alicia vio que había llegado un fotón que se movía apresuradamente entre la muchedumbre y que chocó con un electrón. El electrón salió disparado hacia arriba y aterrizó en el balcón, donde empezó a correr impetuosamente hacia la salida.

Alicia tenía tan fija la mirada en el electrón que no observó otro fotón que corría hacia ella. Hubo un brillante destello y se sintió elevada en el aire. Cuando miró a su alrededor, advirtió que estaba también en el balcón, mirando a la masa de electrones de abajo.

—Esto debe de ser lo que el electrón quería decir por ser excitado al nivel más alto. No me parece muy excitante, pero al menos hay mucho más sitio aquí.

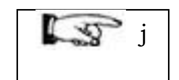


Miró por el borde del balcón al suelo y pudo ver destellos esporádicos aquí y allí, cada uno de ellos seguido del despegue de un electrón del suelo y su aterrizaje en el balcón, en donde se ponía a correr velozmente hacia la salida. Uno de ellos aterrizó cerca de donde se hallaba Alicia.

Miró hacia abajo y pudo ver un pequeño hueco con forma de electrón allá donde éste se encontraba un instante antes. Era claramente visible, porque el color del suelo enlosado contrastaba vivamente con el fondo uniforme de apiñados electrones que cubría el resto de la superficie. En tanto que miraba este espacio, otro electrón cercano pasó astutamente al hueco que acababa de crearse, aunque entonces ya no pudo moverse. No obstante, donde había estado apareció un hueco, y un electrón llegado más recientemente se desplazó hasta él.

«¡Qué cosa tan curiosa! —dijo para sí Alicia—. Me he acostumbrado a ver electrones, ¡pero no esperaba ser capaz de advertir la presencia de un *no electrón* tan claramente!»

Observó con interés cómo el movimiento en el balcón del electrón que al subir había originado el primer hueco estaba equilibrado con el movimiento del hueco con forma de electrón que avanzaba firmemente por el suelo en la dirección opuesta, hacia la ancha puerta por la que ella había entrado.



Cuando el electrón y el hueco se hallaban fuera de su vista, Alicia caminó por el balcón hasta la salida. Pensó que ya había escuchado lo suficiente de la charla del Director. Atravesó la pequeña puerta y se encontró en un largo pasillo. Esperándola cerca de la puerta estaba el Mecánico Cuántico.

—¿Qué te ha parecido? —le preguntó.

—Muy bien, gracias —replicó Alicia advirtiendo que eso era lo que él esperaba—. Fue muy interesante oír cómo el Director conducía la asamblea.

—Eso dices tú —comenzó el Mecánico—, pero desde luego eran los electrones quienes la conducían, una vez que habían sido excitados hasta el nivel de conducción. ¿Sabes?, todos los electrones tienen carga eléctrica, de modo que cuando se mueven, hacen que fluya una corriente eléctrica. La carga que acarrean es negativa, así que la corriente fluye en la dirección opuesta al movimiento de los electrones, pero eso no tiene mucha importancia. Si todos los estados que podría alcanzar el electrón están ya llenos de electrones, como en el nivel de valencia, entonces no puede haber movimiento alguno y estamos ante un aislante eléctrico. Todos los electrones y sus cargas están en posiciones fijas, y en tal caso no puede existir ninguna corriente eléctrica. En el presente caso puede aparecer una corriente sólo cuando los electrones han sido transportados hasta el nivel vacío de conducción, donde hay muchísimo sitio y pueden moverse fácilmente. En ese caso se obtiene una corriente producida tanto por los electrones como por los huecos que dejan atrás.

—¿Pero cómo un *hueco* puede producir una corriente? —protestó Alicia—. Un hueco es algo que ni siquiera existe.

—Para empezar, ¿estarás de acuerdo en que cuando todos los electrones están presentes en el nivel más bajo de valencia no pueden moverse y no existe corriente alguna? —preguntó el Mecánico—. La corriente es justamente la misma que si no estuviera presente ninguna partícula cargada.

—Bueno, sí —respondió Alicia. Eso le pareció bastante razonable.

—Entonces debes admitir que cuando hay un electrón menos, la corriente se parecerá a la debida a uno menos que *ningún* electrón. El hueco en el nivel de valencia se comporta como si fuera una carga positiva. Has visto cómo el movimiento del hueco hacia la puerta era debido en realidad a un gran conjunto de electrones dando un paso en la dirección opuesta. Así pues, la corriente eléctrica producida por los electrones de carga negativa que se mueven desde la puerta es la misma que la que daría una carga positiva moviéndose hacia la puerta. Como ya dije, los fotones producen una corriente a partir de los electrones que ponen en la banda de conducción y de los huecos que dejan detrás.

—Los fotones parecen ser una lata para los electrones —observó Alicia, decidiendo cambiar de tema.

—Bueno, son realmente bastante hiperactivos, pero también son por naturaleza muy brillantes. Como dice el Director, las partículas

son partículas. Supongo que en este momento algunos de ellos están «laseando»[6] electrones en el dormitorio.

—Perdón, ¿pero querrá decir *haciéndoles novatadas*[7]? Estoy segura de que ésa es la expresión que he oído para describir las bromas de estudiantes.

—No, es decididamente «laseando». Ven y lo verás.

Siguieron por el pasillo hasta una habitación al final. El Mecánico abrió la puerta, entraron y cerró la puerta. Se encontraban en una larga habitación en cuyos lados se alineaba una serie de literas. Alicia pudo ver que muchas de las literas superiores estaban ocupadas por electrones, pero las inferiores se encontraban en su mayor parte vacías.

—A veces están en las literas superiores en vez de en las inferiores —puntualizó el Mecánico—. Esto se llama *inversión de población.* Sólo cuando están de esa manera es eficaz el «laseado».

No pasó mucho tiempo antes de que un fotón solitario entrara corriendo en la habitación. Se dirigió apresuradamente a una de las literas y la volcó, haciendo que el electrón cayera de golpe a la de abajo. Alicia quedó admirada al ver que ahora había *dos* fotones correteando juntos por la habitación. Se movían al unísono, de modo que parecían casi uno solo.

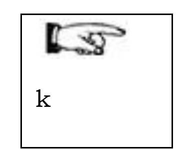
—Eso es un ejemplo de *emisión estimulada* —murmuró el Mecánico a Alicia en el oído—. El fotón ha provocado que el electrón haga una

[6] *Lasing* en el original (pronúnciese «leisin»). Significa hacer que emitan luz coherente, como un láser. (*N. del T.*)

[7] *Hazing* (pronúnciese «heisin», con «h» aspirada). Ahora el juego de palabras (en inglés) es evidente. *(N. del T.)*

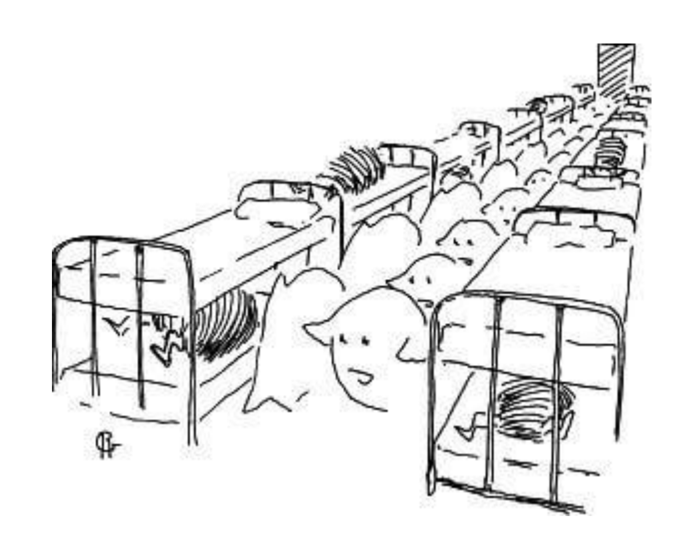
transición al nivel inferior y la energía liberada ha creado otro fotón. Observa ahora cómo se desarrolla la emisión láser.

Los dos fotones corretearon arriba y abajo por la larga habitación. Uno colisionó con un electrón y entonces hubo tres fotones y otro electrón en el nivel inferior. Mientras Alicia miraba, los fotones interactuaron con más electrones, produciendo más fotones. En ocasiones observó que un fotón colisionaba con un electrón que había caído a la litera inferior. Cuando sucedía esto, el electrón salía disparado hacia la litera superior y el fotón desaparecía, pero como inicialmente había muy pocos electrones en las literas inferiores, no era frecuente que ocurriera.



Enseguida una horda de fotones idénticos llenó la habitación, todos ellos corriendo hacia adelante y hacia atrás en perfecto sincronismo. Ahora había casi tantos electrones en las literas inferiores como en las superiores, de manera que era tan probable que las colisiones excitaran un electrón a la posición más alta, con la pérdida de uno de los fotones, como que crearan un nuevo fotón. La corriente de fotones se desparramó hacia fuera a través de la puerta al final del dormitorio y a lo largo del pasillo en forma de un apretado haz de luz coherente. Antes de que hubieran llegado a la mitad del pasillo, colisionaron con la abultada forma del Director, que caminaba hacia ellos.

Éste se detuvo inmediatamente, se irguió todo lo que pudo y extendió su gruesa toga negra a cada lado, de modo que hizo aparecer un denso cuerpo negro que bloqueaba el pasillo de una manera efectiva. Los fotones golpearon el entintado tejido negro y desaparecieron por completo. El Director permaneció allí durante un momento, con aspecto a la vez acalorado y preocupado, y secándose con un pañuelo el sudor de su tosca cara.



—No permitiré comportamientos de esta clase —dijo resoplando—. Les he advertido de que todo fotón que proceda de esta manera será absorbido instantáneamente. Es una tarea caliente, no obstante, puesto que la energía liberada ha de ir a alguna parte, y normalmente acaba en calor.



—Disculpe —dijo Alicia—. ¿Podría decirme adónde han ido todos esos fotones?

—No han ido a ninguna parte, querida. Han sido absorbidos. Ya no existen.

—¡Oh, qué trágico! —exclamó Alicia, que sentía pena por los fotones tan abruptamente extinguidos.

—En absoluto, en absoluto. Todo ello es inherente al hecho de ser una partícula no conservada. Los fotones son de ese tipo. Fáciles de llegar, fáciles de irse. Siempre están creándose y destruyéndose. No es nada muy serio.

—Estoy segura de que sí lo es para un fotón —exclamó Alicia.

—Bueno, ni siquiera estoy seguro de eso. No creo que a un fotón le afecte mucho cuánto tiempo *nos* parece que existe. Viajan a la velocidad de la luz, ¿verdad?, porque después de todo *son* luz. Para algo que viaje a esa velocidad, el tiempo permanece realmente «congelado». Así que, independientemente de lo que nos parezca que sobreviven, para ellos no transcurrirá tiempo alguno. Toda la

historia del Universo pasaría como un relámpago para un fotón. Supongo que ésta es la razón de que nunca parezcan aburrirse.

»Como dije a la asamblea, los fotones tienen muchos papeles importantes que desempeñar en la excitación de electrones de un estado a otro y, ciertamente, en la creación de las interacciones que en primera instancia fabrican los estados. Para hacer esto, es necesario que sean creados y destruidos con mucha frecuencia; son gajes del oficio, por decirlo así. No obstante, la creación de interacciones corresponde sobre todo a los fotones virtuales. No tratamos mucho acerca de ellos aquí. Si estás interesada en los estados y en cómo se las arregla uno para moverse entre ellos, deberías visitar la Agencia de Estados. Tu amigo te mostrará el camino.

El Director los acompañó fuera de la Academia por el sendero que llegaba hasta la puerta principal. Cuando ya caminaban por la carretera, Alicia se dio la vuelta para saludar al Director, que permanecía firme en el centro de la puerta donde lo había visto por primera vez.

Capítulo 6
Realidad virtual

El Mecánico Cuántico condujo a Alicia por la carretera, y a través de una puerta de hierro forjado, hasta un atractivo parque. Bellos arriates, completamente llenos de flores variadas, alineados en ambos lados del camino, les producían una sensación muy placentera mientras paseaban en el cálido día de verano. El sol brillaba en el cielo, desparramando su luz sobre la idílica escena. Al lado del camino revoloteaban mariposas de una brillante flor a otra y un arroyuelo borboteaba colina abajo sobre un lecho de cantos rodados, mientras que aquí y allá, a lo largo de su camino, el agua se desparramaba en una catarata en miniatura. Alicia pensaba que todo eso era muy lindo y miraba a su alrededor con placer cuando vio otra figura que se acercaba a través de un camino convergente.

La recién llegada era sencillamente otra chiquilla, pero en ella había algo muy peculiar. Se parecía un poco a Alicia, pero más bien se asemejaba a la figura que ella había visto alguna vez en los negativos de sus instantáneas. Alicia se acordó de los antielectrones que había visto en el Banco. Para su sorpresa, advirtió que, aunque la niña iba hacia ella, miraba en la dirección opuesta y caminaba hacia atrás. Alicia estaba tan absorta en la notable aparición de esa extraña niña que no advirtió lo rápidamente que se acercaban ambas. Antes de que se diera cuenta de lo que sucedía, habían chocado una contra la otra. Se produjo un destello cegador que le hizo perder el conocimiento. Cuando lo recuperó, se encontró

caminando en solitario a lo largo de la senda que había seguido la otra niña. Mirando hacia atrás pudo ver que la niña-inversa caminaba a lo lejos, siempre hacia atrás, a lo largo de la senda original de Alicia. Ahora, sin embargo, iba acompaña la de otra figura negativa que caminaba junto a ella también hacia atrás. Esta segunda figura se asemejaba a su compañero de antes, el Mecánico Cuántico.



Cuando miró a su alrededor, Alicia se admiró al descubrir que su entorno se había alterado de una manera espectacular. Todo parecía haberse invertido hasta el mínimo detalle. El sol brillaba oscuramente en el cielo, vaciando la luz del paisaje de abajo. A lo largo de la senda, apagadas mariposas revoloteaban hacia atrás de flor en flor y un riachuelo borboteaba colina arriba sobre un lecho de cantos rodados, mientras aquí y allá el agua se encumbraba

hasta la cima de una catarata en miniatura. Alicia no había experimentado antes nada como esto.

Estaba tan fascinada por esta notable escena que no observó que una vez más una niñita corría hacia ella en sentido opuesto. Alicia miró a su alrededor justo cuando ambas colisionaron produciendo otro destello cegador. Cuando se recobró de la conmoción, vio que la niña caminaba a lo lejos por el sendero por el que Alicia había llegado. Notó además que el escenario había vuelto a la normalidad.

«Esto es de lo más curioso —se dijo Alicia—. El primer choque se las arregló de alguna manera para hacer que toda la campiña se invirtiera, mientras que el segundo la ha devuelto a la normalidad. No sé cómo ha podido suceder esto. ¿Cómo mi choque con esa chica, por violento que fuera, pudo afectar al riachuelo y al sol? No tiene ningún sentido.» Alicia continuó debatiendo consigo misma el significado de su reciente experiencia. Ésta había sido tan notable que apenas prestó atención cuando una aguda detonación que se producía junto a ella, al tiempo que un fotón extremadamente energético se precipitaba a través del sendero.

Alicia no había llegado a ninguna explicación satisfactoria de su experiencia reciente cuando el sendero la condujo fuera del parque hasta una ancha llanura que parecía no tener ninguna característica distintiva, salvo un gran edificio de corte utilitario que se erigía frente a Alicia un poco más adelante.

Cuando se acercó, vio que en el edificio había un tablón de anuncios colocado en el centro de su parte delantera, un poco por encima de la cabeza de Alicia. En un extremo ponía Agente Inmobiliario, y en el

otro, Corredor VIRTUAL. En el centro de la vasta fachada vacía había una puerta y un pequeño escaparate lleno de anuncios.

Reducciones genuinas de amplitud para venta rápida

Excelentes características periódicas.

Estados situados en banda de energía apetecible.

Precios atractivos para pronta transición.

Como Alicia no vio a nadie fuera, abrió la puerta y entró. Justamente detrás de la puerta había un corto mostrador y tras él una enorme habitación casi vacía, salvo por lo que parecía ser una estantería que surgía de entre las sombras en la distancia. En el centro de la habitación se veía una única figura sentada junto a un escritorio y hablando por teléfono. Al ver a Alicia, se levantó apresuradamente. Apoyó sus manos en el escritorio y sonrió ampliamente de una manera bastante poco sincera.

—Adelante, adelante —dijo, pasando por alto que Alicia había entrado ya—. ¿Qué puedo tener el placer de enseñarte? ¿Quizás estás planeando mudarte a tu auténtico primer estado? Estoy seguro de que podremos atenderte a tu entera satisfacción.

—Para decirle la verdad —comenzó Alicia, y no es que no hubiera estado tentada de mentir—, no estoy buscando realmente nada. Me dijeron que usted podría informarme acerca de cómo los electrones y otras partículas se mueven entre los estados.



—Bien, desde luego has venido al sitio adecuado. Estamos establecidos desde hace mucho tiempo en el negocio de la transición de partículas. Si no te importa venir conmigo a uno de nuestros locales, trataré de aclararte la situación a tu entera satisfacción.

Alicia entendió que esto significaba que él explicaría las cosas, de modo que dio un rodeo a la mesa y lo siguió hasta una de las estanterías, o lo que fuera. O estaban muy lejos y eran muy grandes o ella y el Agente Inmobiliario menguaron al acercarse, pero, fuera lo que fuera, el caso es que Alicia descubrió al acercarse que se parecían mucho más a un alto bloque de edificios de apartamentos. En ellos había un cartel que rezaba:

Mansiones periódicas

Estaban muy abiertos por la parte delantera, y Alicia pudo ver electrones moviéndose en cada nivel.

—Aquí tienes un buen ejemplo de estados de calidad construidos en niveles de energía bien espaciados. Cada uno está ocupado por el número permitido de electrones, hasta el nivel ocupado más alto. Por encima de éste existen muchos estados vacantes, pero en la actualidad no hay sitio para más electrones en los niveles más bajos. Cuando un electrón está aposentado en un estado, no hay sitio para otro electrón, por supuesto. Dejado a sí mismo, un electrón normalmente no tiene ninguna inclinación a moverse de un estado en el que se ha instalado. No obstante, si esperamos un momento, podemos tener la suerte de contemplar algún movimiento forzado.

Alicia no se movió y observó el edificio; y tras una breve espera vio un fotón precipitarse hacia la parte frontal del mismo. Hubo una conmoción y uno de los electrones del nivel más bajo se elevó bruscamente perdiéndose de vista. Alicia miró a su alrededor para ver de dónde había llegado el fotón. Aparcada cerca, había una camioneta que tenía pintado en uno de sus lados el siguiente anuncio:

Mudanzas fotónicas

Hacemos que la luz realice transiciones

—Estoy de suerte —exclamó el Agente Inmobiliario alegremente—. Un fotón ha cedido su energía a un electrón del nivel más bajo y lo ha excitado justo a uno de los niveles vacantes en la parte de arriba. No conseguimos muy frecuentemente una mudanza desde el nivel fundamental. Eso deja un atractivo sitio vacante. Debo atenderlo de inmediato.

Se fue apresuradamente y enseguida volvió con un cartel anunciador colocado en un poste que clavó en el suelo. El anuncio rezaba:

¡Posesión vacante!

Atractivo estado en nivel fundamental

Apenas había colocado el cartel cuando uno de los electrones en el segundo nivel dio un breve grito y descendió al estado vacío. Una vez allí se acomodó y siguió como si nada hubiera ocurrido. Al tiempo que él caía, Alicia vio salir un fotón. Como el electrón no había caído desde muy lejos, la energía transportada por este fotón

era mucho menor que la que llevaba el fotón que había liberado al primer electrón.

El Agente Inmobiliario suspiró, cogió una brocha de un bote que había traído junto con el anuncio y procedió a tachar la palabra «fundamental» y escribir «segundo». La pintura aún no se había secado cuando Alicia oyó otro chillido. Un electrón del tercer nivel había caído en el sitio vacío del segundo. El Agente Inmobiliario soltó un taco y cambió de nuevo su cartel donde escribió «tercero». Dejó violentamente la brocha en el bote de pintura y se quedó mirando el edificio.

Hubo otro grito agudo. Un electrón de aún más arriba había caído en el tercer nivel. El Agente Inmobiliario arrancó el anuncio del poste, lo arrojó al suelo y empezó a pisotearlo.



—Disculpe —dijo Alicia, algo vacilante de interrumpir esa exhibición de pasión—. Creía que usted había dicho que los electrones permanecerían en sus órbitas si se les dejaba tranquilos, pero esos de ahí parecen haber caído de manera absolutamente espontánea.

—Así puede parecerlo —repuso el Agente, muy contento de haber sido apartado de su momentánea salida de tono—. En realidad, todas esas transiciones electrónicas han sido estimuladas de hecho por fotones, pero no lo has notado porque eran fotones *virtuales*. Los fotones virtuales desempeñan un papel muy importante en todas las interacciones de los electrones.



No sólo dan lugar a esas transiciones aparentemente espontáneas entre estados, sino que también ayudan a crear esos mismos estados en primera instancia. Así que has de saber que las mismas partículas que mantienen en su estado estacionario al electrón son las que obligan a éste a abandonarlo.

> Los electrones pueden ser excitados por fotones para realizar transiciones en cualquier dirección, dando lugar a absorción estimulada y a emisión estimulada. Los electrones que han sido excitados a un estado de mayor energía decaen después a un estado más bajo si hay alguno disponible, incluso si

parece no haber ningún fotón presente. Esto se llama *decaimiento espontáneo*[8]. La mecánica cuántica mantiene que todas las transiciones se originan por algo; no suceden por las buenas. Los decaimientos en apariencia espontáneos están causados de hecho por fotones, pero no por fotones reales. Están estimulados por fotones virtuales: fluctuaciones cuánticas en el vacío.

Alrededor de cualquier carga eléctrica existe una nube de fotones virtuales cuya interacción con otras partículas cargadas produce un campo eléctrico. Al constituir el campo eléctrico, estos fotones virtuales están siempre presentes en un átomo y pueden dar lugar a los decaimientos en apariencia espontáneos de los estados electrónicos.

»Antes de hablarte de partículas virtuales, deberíamos considerar las partículas normales, las que *no* son virtuales. Se las conoce comúnmente como "partículas reales". Lo distintivo en ellas es que hay una relación muy estricta entre sus masas y la energía y el momento que pueden tener. A eso se refiere el anuncio de allí.

El agente señaló un pequeño adhesivo, impreso en papel verde fluorescente, pegado en la fachada del edificio. Decía así:

[8] Se suele conocer como «desintegración espontánea», pero este nombre no es muy apropiado, porque en un proceso de este tipo el átomo no se desintegra realmente. La expresión inglesa *es spontaneous decay*, que sí refleja realmente lo que ocurre en el proceso. *(N. del T.)*

Las partículas reales actúan
en la capa de masas

«Son de verdad aficionados a los anuncios aquí —pensó Alicia—. Éste parece bastante sugerente, aunque he de admitir que no sé lo que quiere decir.»

—La capa de masas —continuó el Agente, como si respondiera a los pensamientos de Alicia— es la región donde la energía y el momento están relacionados de la manera estricta requerida para las partículas reales. Es el camino largo y estrecho seguido por las rígidas partículas convencionales.

»Si se desea ser una fuerza en la comunidad y empujar las cosas, se ha de poder transferir momento. Si se desea mover algo de su sitio, o impedir que algo se mueva, se debe transferir momento. Todo eso significa movimiento, y movimiento implica momento. Hay poca diferencia en empezar un movimiento o detenerlo. Es el cambio del momento lo que desvía los objetos de su trayectoria y hace que las cosas cambien, y es, a ese respecto, el control del momento lo que hace que las partículas sigan una trayectoria determinada.

»En la capa de masas no se puede tener momento sin suministrar la energía cinética apropiada de acuerdo con la masa correspondiente. En el caso de una partícula realmente masiva, que tiene una gran cantidad de energía en forma de masa en reposo, no se necesita tanta energía cinética para dotarla de la cantidad de momento que se necesitaría en el caso de una partícula más ligera. Todas las

partículas reales deben tener la cantidad apropiada de energía para tener momento. Esto es así incluso para los fotones, que no tienen masa en reposo en absoluto.

El Agente se metió la mano en el bolsillo y sacó unos cuantos documentos que parecían de tipo legal.

—Las condiciones son absolutamente precisas. Si las partículas las cumplen, son libres, están exentas de cualquier deuda de energía. Pueden moverse por ahí como deseen y lo lejos que quieran. Pueden ir y venir con toda libertad. Seguro que has visto la regla: «Lo que no está prohibido es obligatorio» —observó.

—Sí, la he visto —replicó Alicia, ansiosa de airear sus conocimientos—. La vi en el Banco Heisenberg, y el Director me habló acerca del momento y…

—Hay otra regla —prosiguió el Agente entusiasmado, sin detenerse realmente a escuchar la respuesta de Alicia—. Reza: «Lo prohibido es mejor hacerlo rápidamente». Ésta es la regla que siguen las partículas virtuales. En la sociedad clásica y educada no se suele hablar mucho de ellas, pero tienen un papel importante que desempeñar en el mundo. Las partículas virtuales tienen comportamientos que las leyes clásicas simplemente no permiten.

—¿Cómo puede ser eso? —preguntó Alicia algo ingenuamente—. Si algo no está permitido, con seguridad ninguna partícula podrá hacerlo.

El agente sí la oyó entonces y contestó a su pregunta.

—Son las fluctuaciones cuánticas las que lo permiten —dijo—. Si has estado en el Banco, recordarás que las partículas disponen de

un préstamo de energía por un tiempo corto. Cuanto mayor sea el préstamo, más corto será el tiempo, desde luego. Probablemente habrás oído la expresión «Lo difícil lo hacemos de inmediato; lo imposible lleva algo más de tiempo». Bien, en mecánica cuántica lo imposible no lleva algo más de tiempo, pero dura algo menos. Las partículas pueden disfrutar de todos los beneficios de la energía que no poseen en un ensayo libre a corto plazo. Esto incluye el poder transferir momento.

En la teoría cuántica el concepto de una partícula no es tan preciso como en física clásica. Las partículas llevan y ceden energía de forma cuantizada, en paquetes discretos. En muchos casos tienen masas definidas que las distinguen claramente de otras partículas y pueden portar cantidades específicas de otras magnitudes, tales como la carga eléctrica. Los fotones tienen masa en reposo cero (que es también un valor definido). Las partículas reales, aquellas que tienen existencia a largo plazo, tienen relaciones estrictas entre los valores de la masa, la energía y el momento. Allí donde las partículas pueden ser creadas y destruidas y tienen sólo una existencia pasajera, éstas no obedecen esas reglas estrictas y las fluctuaciones cuánticas de la energía pueden ser grandes. Esto es en particular cierto para las partículas que se intercambian a fin de que otras partículas interactúen. La entera energía de tales

partículas es una fluctuación cuántica. Ellas son creadas literalmente de la nada. El vacío no está completamente vacío, sino que es una masa en ebullición de esas partículas de vida corta.

—Debe de ser un ensayo libre bastante corto —dijo Alicia pensativamente.

—¡Oh!, lo es, lo es. Pero se trata de algo por nada, así que todas lo quieren. Tendrás una mejor percepción de las partículas virtuales una vez las hayas visto.

—Pero no puedo verlas —protestó Alicia—. Seguramente ésa es la cuestión.

—No puedes verlas por ahora —dijo el Agente severamente—, pero podrás cuando te pongas mi casco de *realidad virtual.*



Caminó rápidamente en la dirección por la que habían llegado, y Alicia esperó no haberlo ofendido. Se sintió aliviada cuando él volvió enseguida, llevando consigo un gran casco de aspecto altamente tecnificado. Tenía un visor transparente que cubría por completo su parte delantera, y había un largo cable prendido a un enchufe en la parte posterior. El cable serpenteaba a lo largo del camino por donde él había llegado hasta que se perdía de vista a lo lejos.

—Aquí está —dijo triunfalmente—. Una maravilla de la tecnología moderna. Sólo tienes que ponerte esto y verás el mundo de las partículas virtuales.

Alicia se puso algo nerviosa al contemplar el casco. Era grande y parecía *muy* complicado; incluso le pareció algo siniestro. No obstante, si le iba a revelar el mundo de las partículas virtuales, estaba dispuesta a probarlo. Se puso el casco. Era muy pesado. El agente se aproximó al casco y lo ajustó algo a la cabeza de Alicia, en el lado que ésta no podía ver. La visión a través del visor se hizo nubosa con pequeñas manchas centelleantes y…

* * * *

Cuando se aclaró su visión, la escena había cambiado espectacularmente. Alicia aún podía ver los electrones en sus diversos niveles, pero ahora en lugar de aparecer dentro de un alto edificio, los vio como intrincados en una red de vívidas líneas que conectaban un electrón con otro, de manera que tenían todo el

aspecto de moscas atrapadas en alguna gran tela de araña de brillantes hilos. Cuando observó más atentamente esos hilos, pudo ver que estaban en realidad compuestos de fotones, pero fotones claramente distintos de los que había visto antes en la Academia.

Todos los fotones que había visto antes se movían muy rápidamente, pero al menos lo hacían de una manera normal. Empezaban en una posición y algo más tarde estaban en otra, incluso aunque sus posiciones no estuvieran nunca exactamente definidas, y en el período intermedio pasaban por todos los puntos entre ambas posiciones. Jamás se le habría ocurrido a Alicia que pudiera viajarse de otra manera, pero algunos de esos fotones virtuales parecían poder hacerlo. Al mirarlos, le resultó muy difícil decir en qué dirección se estaban moviendo. Un hilo determinado de la red, que representaba el comportamiento de un fotón, parecía estar en el mismo instante en las posiciones de los dos electrones que unía, sin manifestar ningún tipo de movimiento normal de una a otra posición. Este enlace entonces desaparecía mientras surgían otros por cualquier parte, en la muchedumbre de fotones que acoplaban las cargas eléctricas de todos los electrones.

En la teoría cuántica se descubre que las partículas muestran propiedades asociadas según la mecánica clásica con ondas continuas. En correspondencia, y según esta concepción, se ve que los campos de fuerza están compuestos de partículas. La interacción eléctrica entre dos

partículas cualquiera cargadas está causada por el intercambio de fotones entre ellas. Estos fotones tienen una existencia breve, lo que significa que están bien localizados en el tiempo y por tanto su energía es incierta. Son partículas virtuales cuya energía y cuyo momento pueden fluctuar muy por encima de los valores que serían normales para una partícula de vida larga.

Era realmente una bonita vista, si bien bastante peculiar. Los fotones virtuales se movían de todas las maneras concebibles, a la vez que algunos de ellos parecían haber dominado el arte de desplazarse de una posición a otra sin requerir realmente que transcurriera tiempo alguno entre la salida y la llegada.

Cuando Alicia estaba contemplando con interés esa extraña escena, el casco emitió un zumbido cerca de su oído, al que inmediatamente siguió un «clic» apagado. La escena frente a ella resplandeció y volvió a ser la escena ordinaria que había visto antes de ponerse el casco. Alicia mostró en voz alta su fastidio al perder de vista el fascinante panorama.

—Lo siento —dijo el Agente—. Me temo que hay un regulador temporal en el mecanismo. Había intentado que funcionase con monedas, ¿sabes?

Alicia estaba demasiado cautivada por la escena que había acabado de contemplar como para prestar mucha atención a las disculpas del Agente y trató de describirle lo que había visto. Como ocurriera

con toda la gente que había conocido en ese extraño mundo, éste comenzó inmediatamente una larga explicación.

—Ése es justamente otro aspecto del modo en que las partículas virtuales pueden hacer cosas que las partículas reales no pueden hacer. De alguna manera es un poco como la penetración de barreras. Espero que hayas visto ya algunos casos de penetración de barreras.

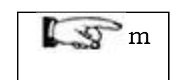
—Así me lo dijeron —respondió cautelosamente Alicia—. Cuando acababa de llegar aquí vi a alguien pasar a través de una puerta cerrada y me dijeron que podía hacerlo porque su función de onda se dispersaba a través de la puerta hasta el interior, lo que permitía una pequeña probabilidad de ser observado al otro lado.

—Eso es completamente cierto. Esa parte de la función de onda permitió a tu amigo penetrar en el interior de una barrera que habría detenido a una partícula según la física clásica. Él no tenía suficiente energía para cruzar la barrera, de modo que cuando estaba penetrando la puerta se hallaba en una especie de condición virtual. Existen muy pocas partículas, si es que existe alguna, que sean reales por completo. Casi todas ellas tienen algunos aspectos virtuales, aunque algunas son más virtuales que otras. Los fotones de intercambio que estabas mirando hace un momento son casi del todo virtuales.

»La regla general es que las partículas virtuales no obedecen las reglas, aunque no pueden evadirlas durante mucho tiempo. Esto significa que pueden hacer cosas para las que realmente no tienen suficiente energía. Estas partículas intercambiadas, como los

fotones que has visto, producen interacciones entre otras partículas. Pueden penetrar en barreras que detendrían una partícula en la concepción clásica, y esto incluye la misma barrera del tiempo. Pueden moverse según un *tipo espacial*, mientras que las partículas reales sólo pueden ser de *tipo temporal*. Esto significa que aunque una partícula real pueda estar fija en la misma posición mientras el tiempo cambia, es incapaz de estar fija en el mismo tiempo mientras cambia su posición. Una partícula virtual puede hacer ambas cosas. Puede moverse lateralmente en el tiempo, si ésa es su elección.

—Eso parece verdaderamente muy curioso —dijo Alicia—. No me sorprende que las partículas reales sean incapaces de hacer eso y que sólo se muevan del pasado al futuro.



—Bueno, eso no es del todo cierto —dijo el Agente un poco como disculpándose—. Es absolutamente cierto que la mayoría de las partículas se mueven hacia delante en el tiempo, tal como supones. No obstante, la mayor parte de las partículas se hace un poco virtual en alguna ocasión, durante colisiones, por ejemplo; así que es posible que una partícula invierta el sentido del tiempo. En un instante se está moviendo hacia delante en el tiempo de una forma respetable y cumplidora de la ley, y el instante siguiente descubre que se le ha dado totalmente la vuelta y que se mueve hacia atrás (hacia el pasado). Aunque puede sorprenderte oírme hablar así, el

caso es que ese comportamiento le está permitido a una partícula real.

—¡Oh! —exclamó de repente Alicia, sorprendiendo al Agente en la mitad de su cuidadosa descripción—. Creo que eso debe de ser lo que me sucedió antes. No pude imaginar lo que me había pasado cuando estaba caminando por el parque y todo a mi alrededor pareció invertirse, pero ahora sé que no era el torrente y las mariposas los que iban hacia atrás. ¡Era yo quien estaba retrocediendo en el tiempo!

Alicia dijo a su acompañante lo que podía recordar del incidente y éste se mostró de acuerdo con la interpretación de ella.

—Ciertamente me parece un caso claro de producción de antipartículas —dijo.

—¡Antipartículas! —exclamó Alicia—. No sabía que eso tuviera algo que ver con antipartículas. Recuerdo haberlas visto en el Banco Heisenberg, pero no entiendo por qué tendrían algo que ver con el presente caso.

—Habría pensado que era evidente —dijo el Agente, aunque a Alicia no le parecía evidente ni mucho menos—. Claro, porque cuando una partícula se mueve hacia atrás en el tiempo, a un espectador le parece algo totalmente opuesto si se mueve de la manera normal, hacia delante en el tiempo. Considera el caso de un electrón. Tiene carga eléctrica negativa, así que cuando se mueve del pasado al futuro de manera normal transporta su carga negativa al futuro. Si, por el contrario, se mueve del futuro al pasado, entonces transporta su carga negativa desde el futuro hasta el pasado, lo que es como si

una carga *positiva* fuera desde el pasado hacia el futuro. En cualquier caso, la carga del futuro se hace más positiva. A un observador externo esto le parece un positrón o antielectrón.

»Lo que te sucedió le habría parecido al resto del mundo como un fotón con una energía inusualmente alta que cede ésta para crear una Alicia y una "antiAlicia". La antiAlicia se movería por ahí hasta colisionar con una Alicia, y las dos se aniquilarían mutuamente, convirtiendo su energía otra vez en fotones.

—¿Cómo puede ser eso? —exclamó algo desanimada Alicia—. No veo cómo esa antiAlicia podría haber encontrado jamás una segunda Alicia para colisionar con ella. Yo soy única, y desde luego no he sido aniquilada —concluyó desafiadoramente.

—¡Ah!, lo que acabo de describir es cómo aparecería *al resto del mundo*, pero la impresión que te causaría a ti sería muy diferente, completamente diferente. Para ti, la aniquilación habría llegado antes que la creación, por supuesto.

—No veo dónde está el «por supuesto» —respondió Alicia con cierta brusquedad—. ¿Cómo puede destruirse algo *antes* de ser creado?

—Claro, ése es el orden natural de las cosas cuando se va hacia atrás en el tiempo. Normalmente, cuando se va hacia adelante en el tiempo se espera que la creación anteceda a la aniquilación, ¿no?

—Sí, desde luego —replicó Alicia.

—Bien, en tal caso, si te mueves *hacia atrás* en el tiempo esperas que la creación llegue antes que la destrucción desde tu punto de vista. Tú estás experimentando lo que ocurre en el orden inverso después de todo. He supuesto que lo deducirías por ti misma.

»En este caso ibas caminando tranquilamente con el Mecánico Cuántico y de repente colisionaste con la antiAlicia. Desde el punto de vista de tu acompañante, tú y la antiAlicia fuisteis totalmente destruidas y la energía de vuestras masas fue transportada al exterior por fotones muy energéticos.

—¡Oh, pobre Mecánico! —exclamó Alicia—. ¡Debe de creer entonces que he sido destruida! ¿Cómo puedo encontrarlo para tranquilizar su mente?

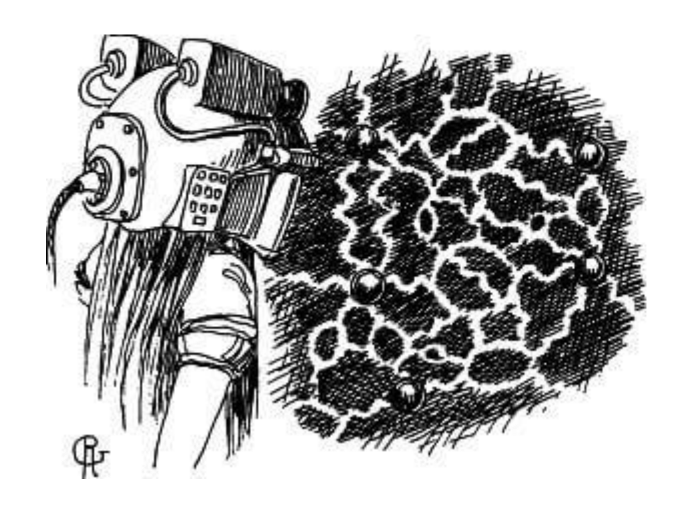
—Yo no me preocuparía demasiado por eso —le aseguró el Agente—. Naturalmente el Mecánico Cuántico conoce la aniquilación de antipartículas, así que sabrá que simplemente has retrocedido en el tiempo. Sin duda esperará encontrarte de sopetón más tarde, o quizás más pronto, dependiendo de lo lejos que hubieras ido. En cualquier caso, el proceso de aniquilación te convirtió en una antiAlicia y viajaste hacia atrás en el tiempo hasta que fuiste creada, junto con una Alicia, por un fotón de alta energía. Así es como le habría parecido a cualquier espectador. Para ti simplemente pareció que de repente no viajabas hacia atrás en el tiempo, sino que habías empezado a moverte hacia delante de manera normal. No has visto el fotón que causó esto. No pudiste verlo porque dejó de existir en el instante en que invertiste tu paso a través del tiempo, así que como Alicia y como antiAlicia estabas en un futuro que él nunca alcanzó.

»Ves ahora que, aunque cualquiera que estuviera observando diría que durante un instante había tres “tús”, dos Alicias y una antiAlicia, de hecho todas eran *tú* misma. Como habías retrocedido

en el tiempo, estabas viviendo el mismo período que viviste cuando caminabas con el Mecánico Cuántico. Cuando volviste a la normalidad mediante el proceso de creación del par (partícula-antipartícula), viviste el mismo período por tercera vez, ahora desplazándote de nuevo hacia delante en el tiempo.

»Esa parte de tu vida fue como un camino que zigzaguea por la falda de una colina, subiendo primero hacia el este, doblando después bruscamente hacia el oeste antes de volver de nuevo hacia el este. Si asciendes siguiendo la dirección norte de esa colina, podrías creer que cruzaste tres caminos diferentes, mientras que de hecho habrías cruzado el mismo camino tres veces. Algo parecido ocurre en la producción de antipartículas. La antipartícula es la sección del camino que va en sentido contrario.

En ese momento hubo un débil zumbido procedente del casco y una lucecita verde brilló en la esquina del visor.



—Creo que el casco está lo bastante recargado para otra demostración —dijo el Agente—. Si miras esta vez con cuidado, podrás hacerte una idea de los efectos de segundo orden.

Le ajustó el casco a Alicia y la visión se nubló...

* * * *

La visión se aclaró de nuevo para revelar que a lo largo de todo el paisaje se insertaba una red de líneas fotónicas. Cuando Alicia observó con más atención una región determinada, pudo ver que unas cuantas de esas luminosas líneas estaban cortadas. En medio de un brillante hilo fotónico pudo observar una especie de lazo en cuya mitad el fotón se tornaba en lo que pudo reconocer como un electrón y un positrón (antielectrón). Éstos se agrupaban otra vez casi inmediatamente para formar un hilo fotónico que iba a unirse a un electrón real.

Mirando aún más de cerca, Alicia pudo ver otro fotón surgiendo tenuemente del electrón en el lazo. En un punto de la trayectoria de este fotón pudo ver el débil contorno de otro lazo electrón-positrón. De él emergían fotones aún más débiles, y si miraba realmente de cerca, podía distinguir lazos electrón-positrón partiendo de aquéllos. Hasta donde fue capaz de distinguir, podía ver fotones creando lazos electrón-positrón y electrones o positrones emitiendo fotones que creaban más pares electrón-positrón. Esto seguía y seguía, en una profusión aparentemente infinita, pero haciéndose cada vez más débil al aumentar el grado de complejidad. Alicia se estaba

mareando mucho al forzar sus ojos para tratar de ver algún final de esta secuencia. Finalmente todo se acabó. Oyó el zumbido y el chasquido del casco y toda la escena se desvaneció por completo.

—Creía que usted había afirmado que los electrones se unían mediante el intercambio de *fotones* —dijo ella en un tono bastante acusador—. Estoy segura de haber visto electrones entre las partículas virtuales. Un montón de ellos, de hecho.

—¡Oh, sí!, seguro que los viste. Los electrones reales originales actúan como fuentes del campo eléctrico, aunque es más correcto decir que las cargas eléctricas transportadas por los electrones son las que producen el campo. A los fotones no les importa nada salvo la carga eléctrica, pero donde haya una de esas cargas siempre se encontrará una nube de fotones a su alrededor. Si pasa por allí otra partícula cargada, estos fotones pueden intercambiarse y producir una fuerza entre ambas partículas. Las partículas intercambiadas han de crearse a fin de intercambiarse y son destruidas después, cuando han sido capturadas. Evidentemente, su número no se conserva, así que han de ser bosones.

»La relación entre fotones y cargas funciona en ambos sentidos. Así como las partículas cargadas producen fotones, a éstos les agradaría crear partículas cargadas, pero no pueden producir sólo una partícula cargada porque la cantidad de carga eléctrica presente no puede cambiar. Ésa es otra de las reglas, y en este caso no se permite incertidumbre alguna. No obstante, lo que los fotones pueden hacer es producir un *electrón* y un *antielectrón*, o positrón, a la vez. Como uno tiene carga negativa y el otro positiva, la carga

total del Universo no ha cambiado. Eso fue lo que viste. Los fotones virtuales producen pares virtuales electrón-positrón, los cuales se aniquilan entre sí y vuelven a ser un fotón. Sin embargo, durante la breve existencia del par, como son partículas cargadas, pueden producir más fotones; esos fotones pueden producir más pares electrón-positrón, y así sucesivamente.

—¡Dios mío! —exclamó Alicia—. Parece excesivamente complicado. ¿Dónde acaba todo ello?

No sólo pueden crearse fotones, sino también partículas tales como electrones, aunque éstos han de ser producidos junto con sus antipartículas para que no haya cambio alguno en la carga eléctrica total. Se requiere energía para crear la masa en reposo de esas partículas, pero la energía necesaria puede estar disponible como una fluctuación de energía durante un período breve de tiempo. Tal fluctuación puede ocurrir aunque no haya presente ninguna energía inicialmente, y las partículas pueden crearse literalmente de la nada. El «espacio vacío» es, de hecho, una mezcla en ebullición de pares partícula-antipartícula.

—No acaba. Continúa así indefinidamente, y se va haciendo cada vez más complicado. Pero la probabilidad de que un electrón produzca un fotón, o de que un fotón produzca un par electrón-positrón, es bastante pequeña. Esto quiere decir que las amplitudes

más complicadas son más débiles y terminan por ser tan débiles que no son perceptibles. Tienes que haberlo visto.

—Bueno —dijo Alicia, a quien la cabeza le daba vueltas al tratar de entender lo que había observado y lo que se le había dicho—, todo lo que puedo decir es que no he visto antes nada igual.

—Bien puedes haberlo hecho —repuso el Agente—. Lo que acabas de ver es como Nada en cualquier otro lugar. Aunque estoy algo sorprendido de que te las hayas arreglado para ver Nada antes de llegar aquí.

—Seguramente yo no diría eso —replicó indignada Alicia—. Puede que no haya viajado mucho, pero de todos modos algo he visto. Suponía que usted sabría eso.

—No tengo duda alguna de que lo has hecho —dijo el Agente Inmobiliario—. Estoy seguro de que procedes de un lugar muy deseable, pero es relativamente fácil ver Algo, ¿sabes? Es mucho más difícil ver Nada. No sé como podrías haberlo hecho sin la ayuda de mi casco de realidad virtual.

—Un momento —interrumpió Alicia, que había empezado a sospechar que ambos estaban hablando con intenciones diferentes—. ¿Me diría, por favor, qué entiende usted por Nada?

—Claro, ¡cómo no! Quiero decir Nada: la ausencia total de partículas reales cualesquiera. El vacío, lo vacuo, el olvido de todas las cosas, o como quieras llamarlo.

Alicia se quedó completamente desconcertada ante el alcance de ese concepto negativo.

—¿Tendría eso un aspecto diferente a través de su casco? Imaginaba que nada tendría el aspecto de nada se mirase como se mirase.

—Claro que hay diferencia. El vacío no es tal vez el mejor vecino, pero existe mucha actividad encubierta. Ven a verlo por ti misma.

El Agente empezó a caminar con paso vivo y Alicia le siguió a través de su despacho. Se le hacía cada vez más difícil creer que aún estaban en un despacho, o en un edificio de cualquier tipo, pues parecía notablemente grande. Anduvieron durante algún tiempo, Alicia con esfuerzo por el peso del casco y el cable que aún se extendía por detrás de ella.

«Me pregunto cómo será de larga esta conexión —se dijo a sí misma—. Estoy segura de que tengo que llegar pronto al final…»

Las mansiones periódicas, en las que había visto los estados electrónicos, quedaron pronto fuera de su vista detrás de ellos, y todavía seguían caminando. Justo cuando Alicia estaba a punto de rogar que se detuvieran para descansar, vio ante sí lo que parecía la orilla de un lago o de un mar en notable calma. Cuando se acercaron, comprobó que era un lago muy grande, si es que era un lago. Se extendía frente a ellos hasta donde alcanzaba su vista, una extensión aparentemente ilimitada. Pero si era el mar, era el paisaje marino más extraño que Alicia había visto jamás. Estaba total y absolutamente en calma, excepto por un débil, casi imperceptible, temblor en la superficie. No era azul, ni verde, ni vinoso, ni de ningún otro color que hubiera oído para describir el agua. No tenía

ningún color en absoluto. Era como una noche profunda y clara pero sin estrellas.

—¿Qué es eso? —dijo entrecortadamente Alicia, vencida por la hipnótica vacuidad de la escena.

—Nada —replicó el Agente—. ¡Es la Nada! ¡Es el vacío!

»Ven —continuó—. Permíteme encender el casco y podrás observar la actividad en el vacío.

Se acercó al casco y de nuevo hizo lo que había hecho antes. La visión de Alicia, su visión de la Nada, se nubló…

* * * *

Su visión se aclaró para revelar una escena muy similar a la última que había visto a través del casco. De nuevo vio una malla de hilos brillantes. Esta vez, sin embargo, no vio que los hilos acabaran en electrones reales, que antes habían parecido estar atrapados en la red, pero eran en realidad la fuente de ésta. Ahora no estaban presentes partículas reales, sólo las virtuales. Los fotones creaban pares electrón-positrón. Los electrones y positrones producían más fotones, justamente como había visto antes. Previamente, la red se había originado a partir de electrones reales, que eran su fuente y estaban anclados en el mundo de las partículas reales. ¿Dónde estaba ahora su fuente? Los pares electrón-positrón eran producidos por fotones; los fotones eran producidos por pares electrón-positrón, que a su vez eran producidos por fotones. Alicia intentó seguir hacia atrás las líneas de partículas para encontrar su

fuente, pero descubrió que daba vueltas y más vueltas en círculo. Tuvo la impresión de haber perdido la pista, y trataba nuevamente de seguir las líneas con más cuidado cuando oyó el zumbido familiar y el fuerte chasquido y la escena desapareció por completo.

Alicia explicó una vez más lo que había visto al Agente y le dijo que había sido incapaz de decidir qué partículas se habían creado con otras.

—No me extraña —contestó el Agente—. Todas ellas crean una a otra, ¿sabes? Es como lo del huevo y la gallina, con todas ellas puestas y poniendo al mismo tiempo.

—¿Cómo puede ser eso? —preguntó Alicia—. Tiene que haber una fuente. No pueden haber surgido de ningún sitio.

—Me temo que pueden hacerlo y que lo han hecho —fue la respuesta—. Todo lo que impide normalmente la producción de pares partícula-antipartícula es la necesidad de suministrar energía para las masas en reposo de las partículas, y las partículas individuales no tienen esa inhibición. La cosa en su totalidad es una enorme fluctuación cuántica.

—¿Es entonces real? —preguntó Alicia—. ¿Existen realmente esas partículas en absoluto?

—¡Oh, sí!, son completamente reales, aunque no en el sentido técnico de *partículas reales*. Son una parte vital del mundo como cualquier otra cosa. Creo, sin embargo, que ya has visto todo lo que necesitas ver a través del casco —continuó diciendo, y levantó el pesado instrumento de la cabeza de Alicia—. No lo necesitaremos

más, así que pondré en funcionamiento el mecanismo de rebobinado.

Apretó un botón a su lado y el casco comenzó a rebobinarse a lo largo de su cable, reptando rápidamente sobre el terreno en la dirección de la que habían venido, habían llegado, como una araña mecánica, hasta que se perdió de vista.

Aunque el casco había desaparecido, la cabeza de Alicia aún estaba llena de las singulares escenas que había visto, las cuales daban vueltas en su mente cuando caminaba en silencio junto al Agente Inmobiliario a lo largo de la orilla del infinito vacío.

Capítulo 7
Átomos en el vacío

Alicia caminó con el Agente Inmobiliario a lo largo del borde del vacío mirando la tenue superficie temblorosa que bullía continuamente con la actividad de las partículas virtuales en tanto que éstas nacían y morían sin ser percibidas.

A pequeña distancia de la orilla, Alicia vio una pequeña perturbación en la superficie, una especie de depresión circular en el nivel generalmente uniforme. Más allá pudo ver otros hoyos, y cómo muchos de ellos se reunían en grupos. Algunos de éstos eran pequeños, pues consistían en sólo dos de los objetos circulares. Otros conjuntos eran más extensos. Pudo ver un grupo que contenía un anillo formado por seis de los objetos dispuestos circularmente, mientras que otros estaban unidos por fuera al anillo. A lo lejos pudo ver conjuntos enormes que se extendían a través de la superficie. El mayor contenía centenares de esas cosas circulares, fueran lo que fueran.

En su observación, Alicia vio fotones elevándose intermitentemente desde una u otra de las formas que se esparcían ante ella. Los brillantemente coloreados fotones se parecían bastante a bengalas disparadas por barcos en el mar.

El Agente siguió la dirección de la mirada de Alicia.

—Veo que estás observando los átomos que nadan en el vacío. Los átomos nos suministran, de una u otra forma, mucho de nuestro trabajo en el negocio de los estados de los electrones. Puedes ver

desde aquí las diversas asociaciones moleculares que han establecido entre ellos. Van desde pequeños «negocios» de dos átomos hasta enormes conglomerados orgánicos. Cada tipo diferente de átomo tiene su propio espectro distintivo de colores para los fotones que emite, de modo que éstos actúan como señales que ayudan a identificar los diversos tipos de átomos.



—Me estaba preguntando acerca de esas cosas de ahí fuera —admitió cándidamente Alicia—. No puedo verlo claramente desde aquí. ¿Sería posible acercarnos?

—Si deseas observar más de cerca los átomos deberíamos ir a los «Amarraderos Mendeléiev». Allí verás expuestos todo tipo de átomos, con todos los diferentes elementos dispuestos en orden regular.

El Agente condujo a Alicia a lo largo de la orilla hasta que tuvieron a la vista un embarcadero extremadamente largo y estrecho que se extendía a lo lejos sobre el vacío. En el extremo de tierra se encontraba una puerta arqueada en cuya parte superior había un anuncio que decía:

EL MUELLE PERIÓDICO

Prop. D. I. Mendeléiev

Establecido en 1869

—Hemos llegado —anunció el Agente—. Aquí es donde los átomos están en el dique hasta que se disponen a formar los diversos compuestos químicos. Lo solemos llamar el «Embarcadero Mendeléiev» o el «malecón atómico», aunque a veces la gente habla del «muelle del Universo». Encontrarás representados aquí todos los tipos diferentes de átomos.

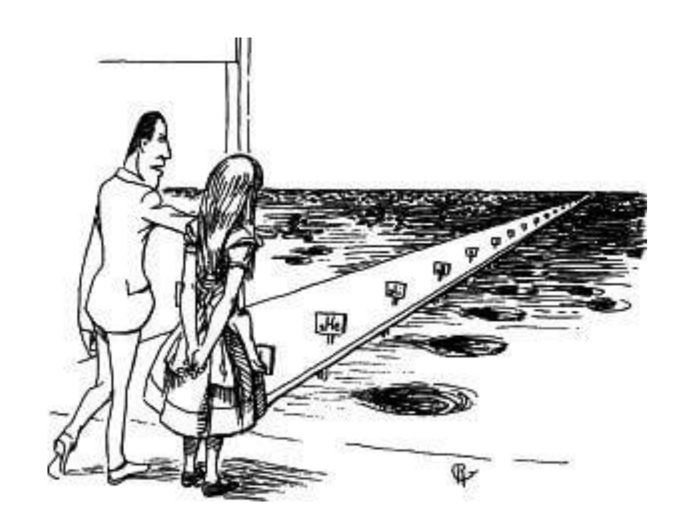
Pasaron juntos bajo el anuncio y llegaron hasta las tablas del muelle. Pasearon lentamente a lo largo del fondeadero, al tiempo que Alicia miraba la larga fila de átomos amarrados a un lado. Cada uno de ellos le parecía como un hoyo «atrompetado» en la lisa superficie del vacío circundante. Esa forma le recordaba el pequeño remolino que veía frecuentemente formarse en el desaguadero cuando vaciaba la bañera, aunque estos de ahora parecían inmóviles y sin rotación aparente. La superficie circundante de deslizante vacío caía oblicuamente en cada hoyo desde el nivel aún llano que se extendía a su alrededor. Caía al principio con un gradiente casi imperceptible, pero aumentaba al acercarse al embudo del centro. Había señales de actividad, que tenía lugar en algún sitio en las profundidades del hoyo.

—¿Por qué hay un agujero tan profundo? —preguntó Alicia con curiosidad—. Puesto que miramos a la Nada, yo esperaba que fuera lisa y amorfa.

—Eso es un pozo de potencial —fue la respuesta.

—¿Qué clase de pozo es ése? —continuó preguntando Alicia—. Conozco los pozos de huerta, que suministran agua, y los pozos de

petróleo, y recuerdo vagamente haber leído hace poco en un libro algo sobre pozos de melaza, pero ¿qué hay en un *pozo de potencial*?



—Bueno, la fuente del potencial, por supuesto. Se ha de tener una fuente para suministrar agua a un pozo de huerta. Aquí hay una carga eléctrica como fuente del potencial eléctrico en el pozo de potencial. Deberías ya saber lo que hay en el pozo de potencial. Contiene fotones virtuales. Ellos proporcionan la atracción eléctrica que haría que la energía potencial de una carga negativa cayera más y más por debajo del nivel del vacío circundante cuando ésta se mueve hacia la fuente de potencial en el centro del átomo. La fuente de potencial crea realmente el pozo, ¿entiendes?

El primer hoyo era bastante suave, pero Alicia pudo constatar que los otros se hacían cada vez más profundos cuanto más lejos estaban situados a lo largo del muelle. El dique se extendía a lo lejos por delante de ellos, con un átomo tras otro amarrados a lo largo del costado. Al lado de cada uno de ellos había un pequeño anuncio para señalar el amarre. El primero de ellos rezaba: «$_{1}$H»; el

segundo, «$_2$He»; el tercero, «$_3$Li». Cada posición tenía una etiqueta diferente.

—¿Partirán de aquí en su momento todos estos átomos para combinarse en grupos como los ya presentes en la superficie del vacío? —preguntó Alicia.

—La mayoría de ellos lo hará, ciertamente, pero hay unos pocos que no, como el que tenemos aquí, por ejemplo.

Hicieron una pausa al lado de un átomo que portaba el anuncio: «$_{10}$Ne».

—Éste es un átomo del grupo de los gases nobles. Ellos son de clase aristocrática, lo que significa que rehúsan cualquier clase de comercio. Se valen por sí mismos. Se encuentran perfectamente satisfechos consigo mismos y no se mezclan con nadie más. Siempre viajan en un espléndido aislamiento. Nunca los verás formando parte de compuestos de ningún tipo.

Caminaron un poco más y el Agente explicó que, aparte de los huraños átomos nobles, había una diversidad considerable en el entusiasmo con el que los diversos átomos se unían en compuestos.

—Por ejemplo, éste es un elemento particularmente activo —puntualizó, a la vez que se acercaban a un anuncio que decía: «$_{17}$Cl».

Alicia decidió que era el momento de examinar uno de esos átomos más de cerca, así que probó a extender un pie fuera del borde del malecón. Notó encantada que no se hundía. Su pie permaneció sobre un pequeño hoyuelo en la superficie, como algunos insectos de charca que había visto una vez. Sin embargo, cuando intentó

caminar hacia el átomo descubrió que no existía fricción alguna en el vacío. La superficie era *extremadamente* resbaladiza, y fue por completo incapaz de mantener el paso. Con un pequeño grito derrapó por la pendiente cada vez más pronunciada hasta que fue a parar al profundo hoyo.

Cuando estaba cayendo, Alicia pensó que tenía un montón de tiempo para mirar a su alrededor. Los lados del pozo se hacían cada vez más empinados al cerrarse sobre ella, y pronto se dio cuenta de que estaba cayendo a través del trazado fantasmal de una serie de habitaciones de techos bajos y cercanos entre sí. Las primeras habitaciones eran ciertamente muy bajas, apenas lo bastante altas para una casa de muñecas, pero al seguir cayendo las habitaciones se iban haciendo más altas. Al principio estaban todas completamente vacías e inhabitadas, pero después llegó a una habitación que contenía una gran mesa redonda rodeada de sillas. En el suelo, debajo de ésta, pudo ver escritorios y archivadores, como si pasara por alguna clase de oficina.

Los estados que pueden ocupar los electrones en un átomo tienden a agruparse en un conjunto de niveles que están separados por brechas significativas en su energía. Si un átomo tiene su nivel más externo ocupado completamente lleno con todos los electrones que puede mantener, cualquier electrón que se le añadiera tendría que ir a un estado de energía más alta. Tendrá normalmente una energía más baja

si permanece en su estado atómico original. Los átomos de este tipo, cuyas capas más externas están completamente llenas de electrones, constituyen los gases nobles y no interactúan químicamente con nada de manera normal.



Conforme pasaba el tiempo, su sorpresa iba en aumento al descubrir que seguía cayendo, sin señal alguna de llegar al fondo. Abajo, abajo, abajo; ¿no acabará *nunca* la caída?

Alicia comenzó poco a poco a darse cuenta de que su caída *no* tendría fin. No había llegado al fondo del agujero, pero tampoco bajaba más. Flotaba sin ningún sostén en el centro del embudo, a la altura de una de las sombrías habitaciones. Miró a su alrededor y observó que no estaba sola. Cerca de ella había dos electrones empeñados en una actividad febril. Alrededor de ellos pudo distinguir el apagado contorno de una oficina extremadamente pequeña y abarrotada.

—Disculpen —se dirigió a ellos—. ¿Creen que podrían parar por un momento y decirme dónde estoy?

—No hay sitio, no hay sitio —le gritaron.

—Perdón, ¿qué quieren decir? —exclamó Alicia, a quien esa respuesta no le parecía particularmente relevante.

Un átomo está imbuido del campo eléctrico generado por su núcleo de carga positiva. Dicha carga produce un *pozo de potencial* alrededor del núcleo, que a su vez define los estados disponibles para ser ocupados por los electrones. La selección de estados disponibles es una forma de efecto de interferencia, del tipo de la gama de notas que puede obtenerse de un tubo de órgano o de una cuerda de violín. Un tubo puede dar sólo unas cuantas notas, en las que las correspondientes longitudes de onda del sonido se ajustan al tubo. De manera análoga, los estados electrónicos permitidos tienen que encajar en el pozo de potencial. Los estados permitidos se agrupan en diferentes niveles de energía. Cualquier otra función de ondas que no corresponda a uno de tales estados es eliminada mediante interferencia destructiva.

—No hay suficiente sitio aquí para que aflojemos la marcha, y mucho menos para *pararnos* —le respondieron—. Como sabes, cuando la posición de una partícula está restringida, la relación de

Heisenberg fuerza a que su momento sea grande, y esto se encuentra tan abarrotado que no nos queda más remedio que movernos sin parar. Si tuviéramos tanto sitio como hay en algunos niveles superiores, podríamos permitirnos movernos más pausadamente, pero aquí no es posible. Éste es el nivel más bajo, ¿te das cuenta?, así que lo normal es que estemos siempre atareados.

—¿De veras? —preguntó Alicia—. ¿Qué es eso tan importante que hacen?

—No hacemos nada en particular. Nadie está particularmente interesado en *lo que* están haciendo los electrones en el estado fundamental, siempre que sigamos moviéndonos.



—En ese caso, ¿creen que serán capaces de decirme dónde estoy *sin* pararse? —preguntó Alicia—. No sé adónde he llegado. ¿Qué impide que alguno de nosotros se precipite aún más dentro del pozo?

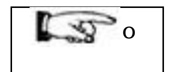
—Te encuentras en el nivel inferior de un átomo de cloro, como ya te hemos dicho. Aquí estamos tan cerca de la fuente del potencial que hay muy poco sitio, así que debemos movernos muy rápidamente porque nuestro momento está obligado a ser alto. Esto significa que nuestra energía cinética es también alta. Ninguno de nosotros se halla en un estado particularmente virtual, ¿entiendes? Los electrones tienen posiciones seguras en los átomos, muy bien aseguradas. La mayoría de átomos está rondando por aquí desde hace tiempo y las fluctuaciones cuánticas de energía son pequeñas, así que para nosotros, electrones, la energía y el momento están relacionados apropiadamente.

»Probablemente sabes que cuando un electrón, o cualquier otra cosa, cae más en el interior de un potencial, pierde energía potencial, y ésta se convertirá en energía cinética —siguieron diciendo.

—Sí, me lo explicaron cuando visité el Banco Heisenberg —manifestó Alicia.

—Aquí en este pozo de potencial, sin embargo, cuanto más nos acercamos al centro, menos sitio hay, de modo que necesitamos tener más energía cinética. Si tratáramos de caer aún más, necesitaríamos poseer más energía cinética de la que podemos obtener mediante la conversión de energía potencial, así que no podemos caer más. De hecho, paradójicamente, no tenemos suficiente para ser capaces de caer más bajo y no podemos pedir prestada la energía en forma de fluctuación cuántica porque la necesitaríamos para mucho tiempo.

»Sólo hay dos estados en este nivel, de modo que solamente hay sitio para dos electrones, uno en el estado de espín-arriba y otro en el de espín-abajo. Hay más estados disponibles conforme se sube hasta los niveles de mayor energía, así que se encontrarán más electrones en los niveles de arriba. Cada uno de los dos niveles siguientes puede acoger hasta ocho electrones. En cualquier átomo, los niveles inferiores, los que tienen la menor energía potencial, son los primeros que se llenan. El principio de Pauli permite sólo un electrón en cada estado, así que cuando todos los estados en un nivel determinado ya tienen un electrón, cualquier electrón extra no puede hacer sino ir a niveles más altos. Los niveles se llenan a partir del fondo hasta que los electrones están acomodados. El nivel más alto que contiene algún electrón se denomina "nivel de valencia". En él se encuentran los electrones de valencia, aunque hay un montón de sitios vacantes más arriba en el ático. Los electrones de valencia toman todas las decisiones y controlan los compuestos a los que puede unirse nuestro átomo. Si deseas descubrir cómo opera un átomo, lo mejor que podrías hacer es subir a hablar con ellos.



—¿Cómo puedo subir desde aquí a ese nivel? —preguntó Alicia.

—Bueno, si fueras un electrón tendrías que esperar a ser excitada al nivel más alto por un fotón que podría proporcionarte la energía

extra que necesitarías. En tu caso, sin embargo, espero que te pueda llevar arriba el Operador Escalera.

—¿No querrá decir el ascensorista? —inquirió Alicia—. He montado en un ascensor en unos grandes almacenes y había un ascensorista que llevaba a la gente de piso en piso, pero nunca he oído que hubiera alguna escalera que lo necesitara.

Sin embargo, cuando miró a su alrededor pudo ver una especie de escalera con peldaños ampliamente separados. A su lado había una figura bastante confusa.

—¿Puedo preguntarle quién es usted? —dijo Alicia picada de curiosidad.

—Soy el Operador Escalera. No soy una criatura física, sino un mero constructo matemático. Mi tarea consiste en transformar un sistema de un estado a otro superior o inferior.

Realizó una complicada operación que Alicia fue incapaz de comprender pero que acabó subiéndola escalón por escalón hasta el nivel más alto.

Alicia llegó al nivel en el que había visto la gran mesa redonda. Este nivel contenía más electrones que el primero. Pudo contar ocho en total, aunque con alguna dificultad. Como todos los electrones que había visto hasta el momento, éstos también se movían enérgicamente. Algunos daban vueltas en torno a la mesa, unos en un sentido y otros en el contrario. Los otros no parecía evidente que rotaran, pero en cualquier caso se movían. Ninguno de ellos estaba tranquilamente sentado en alguna de las sillas en torno a la mesa, sino que daban brincos, y algunos se acercaban y alejaban de la

mesa. Los electrones no estaban nunca en reposo, aunque en este nivel no se movían tan frenéticamente como lo hacían en el nivel más bajo.

—¡Hola, Alicia! —exclamaron cuando ella apareció—. Ven y permítenos mostrarte cómo opera un átomo formal de tamaño medio. La manera en la que la Corporación Cloro lleva sus negocios la decidimos nosotros, los siete electrones del nivel de valencia.

—¡Pero ustedes son ocho! —protestó Alicia.

—Eso es porque hemos entrado en asociación con otro átomo, del Sindicato Sodio, para formar la molécula de cloruro sódico. Trabajando así juntos nos complace pensar que somos «la sal de la tierra». Un átomo marcha con mayor armonía cuando todos sus niveles que pueden contener electrones están completamente llenos. En nuestro propio caso sólo tenemos siete electrones en el nivel de valencia, y sodio únicamente uno, aunque tiene sitio para ocho. Nos viene bien que el electrón de valencia de sodio venga aquí a aposentarse en nuestro nivel de valencia y lo complete. Esto significa que nosotros ahora tenemos un electrón extra y por tanto una carga negativa. El átomo de sodio tiene un electrón de menos, lo que le proporciona una carga positiva, y la fuerza eléctrica entre estas cargas opuestas mantiene unidos los dos átomos. Esto se conoce como *enlace iónico* entre los átomos, y es una de las formas comunes de estructura corporativa.

—Eso parece muy cooperativo por ambas partes —convino discretamente Alicia—. ¿Cuál de ustedes es entonces el electrón que procede del átomo de sodio? —preguntó.

—Soy yo —exclamaron todos a la vez. Hicieron una breve pausa y se miraron entre sí—. No, es él —dijeron ahora hablando aún perfectamente al unísono. Alicia se dio cuenta de que no se iba a ninguna parte formulando cualquier pregunta que tratara de distinguir electrones idénticos.

—¿Podría, por favor, explicarme por qué dice que el átomo de sodio tiene una carga eléctrica positiva cuando ha perdido uno de sus electrones? —preguntó siguiendo otra táctica—. Con seguridad tiene unos cuantos electrones más, y es de presumir que éstos tengan también cargas negativas.

—Eso es completamente cierto; todos nosotros, electrones, tenemos la misma carga negativa porque somos idénticos. Normalmente en un átomo esta carga está equilibrada y neutralizada por una cantidad igual de carga positiva que lleva el núcleo. Los átomos son normalmente neutros, sin carga eléctrica de uno u otro signo. Así que cuando un átomo tiene un electrón más de lo usual, estará cargado negativamente; se le conoce como un *ion negativo*. Si tiene un electrón menos de lo normal, dominará la carga positiva del núcleo y el átomo se convertirá en un *ion positivo*.

—Ya veo —dijo Alicia pensativamente—, ¿pero qué es ese núcleo del que habla?

—Todo átomo tiene uno —fue la evasiva respuesta—. Pero no deseas saber mucho sobre él. ¡Seguro que no! —añadió con nerviosismo.

En ese instante la conversación fue interrumpida por un grito apagado que surgió de algún sitio debajo de ellos, atravesó el nivel de valencia muy de cerca y finalmente se paró en algún lugar por

encima. Alicia miró hacia arriba y vio que era debido a un electrón que aparentemente había sido excitado por un fotón desde su posición en un nivel inferior y parecía ahora estar muy incómodo en uno de los remotos niveles vacíos. El electrón erró lentamente por el amplio nivel elevado hasta que acabó por dar un corto grito y se precipitó al nivel de más abajo. Al hacer esto, un fotón surgió del átomo llevando consigo la energía liberada en la caída. Alicia observó con interés cómo el electrón caía sucesivamente desde un nivel al siguiente, emitiendo un fotón en cada paso. Como los niveles inferiores de energía estaban más separados que los superiores, el fotón creado tenía mayor energía en cada caída sucesiva. Al crecer su energía, el color de la luz se desplazaba cada vez más hacia el extremo azul del espectro.

Al mirar hacia abajo, Alicia vio que el espacio dejado por el electrón que había sido excitado del nivel inferior se había llenado y que faltaba uno de sus compañeros en el nivel de valencia. En un tiempo corto, el electrón que caía se había precipitado al nivel de valencia y había ocupado el sitio vacante. El átomo había vuelto a su estado original. Dos electrones habían intercambiado sus niveles, pero como eran idénticos no había ninguna diferencia.



—Habrás notado los diversos colores de los fotones que he emitido —dijo con orgullo uno de los electrones. Esta observación hacía pensar que el electrón que acababa de hablar era el que había

caído, pero Alicia tenía ya demasiada experiencia con la identidad de los electrones para caer en la trampa—. Ésa es la manera en que los átomos emiten luz, ¿sabes?: al cambiar los electrones de un nivel a otro. Todos los fotones eran de diferente energía, y por tanto de diferente color, porque las distancias entre los diversos niveles son distintas. Están muy juntos en la parte alta del pozo pero se van separando conforme se va más abajo. Este espaciamiento de los niveles es distinto en los diferentes tipos de átomos, de manera que el conjunto de energías de los fotones es completamente característico de cada tipo de átomo; tan característico como una huella humana.

Apenas habían acabado de acomodarse los ocho electrones, o lo habían hecho lo mejor que podían mientras continuaban moviéndose frenéticamente, cuando se produjo un temblor que pareció agitar por completo el átomo.

—¿Qué ha sido eso? —exclamó algo alarmada Alicia.

—Era una interacción de alguna clase. Hemos sido separados de nuestro socio sodio y vamos a la deriva a través del vacío como iones negativos libres. Pero no te preocupes. Preveo que no estaremos a la deriva mucho tiempo. Volveremos enseguida a la actividad si se acuerda el intercambio.

—¿Qué intercambio es ése? —preguntó Alicia—. ¿Quiere decir el intercambio de acciones en la Bolsa? Tengo entendido que controla los negocios en mi mundo.

—En nuestro caso queremos decir intercambio de electrones. Todas nuestras actividades están regidas por algún tipo de interacciones

de electrones, así que es el intercambio de electrones lo que es significativo. ¿Te gustaría visitar el intercambio?

—Sí, creo que sí —replicó Alicia—. ¿Cómo puedo llegar allí desde aquí? ¿Es un viaje largo?

—Oh, no. No realmente. De hecho no es un viaje en absoluto. Como te encuentras en un átomo en interacción, estás ya allí en cierto sentido; sólo necesitas una representación diferente. Todo radica en cómo se miran las cosas. No tienes más que seguirme.

Como le había dicho el electrón, no parecían ir a ningún otro sitio, pero de todas maneras Alicia se encontró en compañía de un electrón en el extremo de una amplia habitación. El suelo estaba lleno de electrones que se agrupaban en torno a una gran mesa en el centro de la habitación. A Alicia le pareció una de esas mesas que había visto en las viejas películas de guerra, donde los comandantes se mueven en torno a diversos tableros que representaban aviones, barcos o ejércitos. En esta mesa vio también un gran conjunto de tableros que estaban siendo movidos en diferentes agrupaciones.

Miró más de cerca alguno de esos tableros y vio que llevaban las mismas etiquetas que los amarres de átomos en el Muelle Periódico. Parecían versiones reducidas de los átomos que había visto a lo largo de ese amarradero. «Quizás son los mismos —pensó—. Tal vez son los mismos átomos que estoy viendo de forma diferente. Supongo que en lugar del Muelle Periódico, esto debe de ser la Tabla Periódica».

A lo largo de las paredes de la habitación había filas de pantallas en las que pudo ver columnas de números que cambiaban al moverse los átomos de un grupo a otro.

—¿Son los precios de los diversos átomos? —preguntó Alicia.

—Sí, algo así. Esos números nos informan de las energías de los diversos electrones que entran en las combinaciones químicas. Expresan las *energías de enlace* de los electrones. La cantidad en la que se ha reducido la energía de un electrón por debajo del valor que tendría si fuera libre. Cuanto mayor es el valor citado, menor es la energía que tiene el electrón, y por tanto más estable es el compuesto que liga. La tarea del Intercambio es hacer que estas energías de enlace tengan el mayor valor posible.

—¿Y todo esto se lleva a cabo moviendo electrones de un átomo a otro? —inquirió Alicia, que recordaba la explicación que le habían dado acerca del enlace en el cloruro sódico.

—No siempre, no. A veces ése es el método más eficaz, y entonces el enlace se hace de esa manera. El intercambio de electrones puede presentar ventajas moviendo electrones de un sitio a otro porque los estados electrónicos disponibles en un átomo están ordenados en niveles, o capas, con grandes espacios entre ellos. La energía de enlace del último electrón en un nivel más bajo es mucho mayor que la del primer electrón que ha de ir al nivel más alto siguiente. Esto quiere decir que hay un método fácil de mejorar el balance global de energía de un átomo que tiene un solo electrón en su capa más alta. Si este electrón puede moverse desde su espléndido pero extravagante aislamiento a una capa casi llena en algún otro átomo,

entonces casi con seguridad habrá una ganancia global en la energía de enlace.

»Es igualmente cierto que, cuando un átomo tiene sólo un espacio por ocupar en su nivel ocupado más alto, este estado tendrá una energía inusualmente baja, y cualquier electrón que sea a él transferido mejorará muy probablemente su balance de energía. Por lo general es cierto que los átomos con un electrón de más o de menos son los más activos, los que con más probabilidad tomarán parte en transacciones y en la formación de compuestos. Los átomos con sólo dos electrones en un estado elevado y aquéllos con sólo dos espacios en un nivel más bajo pueden ocuparse en transferencias de electrones parecidas, pero la ganancia de energía del segundo electrón suele ser muchísimo menor que la del primero y es mucho menos efectiva.

—Entonces ¿qué puede hacer un átomo si tiene varios electrones en su capa externa? —preguntó Alicia, como era previsible.

—Un átomo así ha de cambiar a otra clase de ligadura, la que se conoce como *enlace covalente*. Un átomo como el carbono, por ejemplo, tiene cuatro electrones en su capa externa. Esto significa que tiene cuatro electrones de sobra para ser una capa vacía y le faltan cuatro para ser una llena. Está demasiado bien equilibrado como para ganar algo transfiriendo electrones a otro átomo o recibiéndolos de éste, así que en lugar de ello los *comparte*. Resulta que si los electrones de los dos átomos se hallan en una superposición de estados tal que cada uno de estos electrones

puede estar en cualquier átomo, entonces la energía de los dos átomos puede reducirse y esto sirve para unirlos.

»El enlace iónico, en el que un electrón pasa completamente de un átomo al otro, puede funcionar sólo entre átomos muy diferentes, uno de los cuales tiene un electrón de más y el otro uno de menos. Por otro lado, el enlace covalente funciona cuando ambos átomos son del mismo tipo. El ejemplo más notable lo proporciona el enlace covalente de átomos de carbono, base de los enormes Conglomerados Orgánicos.

Si un átomo tiene sólo un electrón en su nivel más externo mientras que a otro le falta un electrón para completar un nivel, ambos pueden conseguir una energía global más baja transfiriendo el electrón aislado de uno al nivel de valencia casi lleno del otro. Esto es la química: los electrones en sus diversos niveles de energía enlazan los átomos. Los detalles de la química pueden ser muy complicados en la práctica, pero ése es su principio fundamental.

Un átomo contiene el número de electrones que se necesita para neutralizar la carga positiva del núcleo. Estos electrones llenan los estados de menor energía, con un electrón en cada estado. Si un átomo tiene un espacio vacío en su nivel ocupado más alto y otro átomo tiene un electrón que ha de ir a un nivel más alto, entonces la energía global puede reducirse transfiriendo este electrón al espacio libre

en el primer átomo. Ambos átomos tienen ahora carga eléctrica neta, y la atracción resultante los une para formar un compuesto químico.

Alicia pudo sentir cómo de los manipuladores de electrones en torno a la mesa emanaba una atmósfera de temeroso respeto al mencionar a los Orgánicos.

—Un átomo de carbono tiene cuatro electrones en su nivel exterior, o de valencia. Si cada uno de estos electrones se combina con electrones de otros átomos, los ocho estados electrónicos contribuyen a la superposición y la capa efectivamente se llena. De este modo un átomo de carbono puede ligarse hasta con otros cuatro átomos, que pueden ser también de carbono. El átomo de carbono puede asimismo intercambiar dos de sus electrones con otro átomo de carbono para dar un *enlace doble*, en cuyo caso no se conectará con otros tantos átomos, aunque la conexión será más fuerte.

»El enlace iónico más fuerte conecta sólo un átomo con otro, así que no da lugar a moléculas grandes. En el caso en que haya dos electrones para transferir, las cosas pueden hacerse más complejas. Incluso entonces la situación no puede compararse con la del carbono, en la que un átomo puede conectarse con otros cuatro y cada uno de éstos puede a su vez conectarse con otros. Los compuestos basados en carbono pueden desarrollarse en enormes

moléculas orgánicas de gran complejidad, que pueden llegar a contener centenares de átomos.

—¿Forman compuestos de la manera descrita por usted los diferentes tipos de átomos que puedo ver allí? —preguntó Alicia.

—Sí, excepto los gases nobles. En éstos, los átomos tienen ya las capas de valencia llenas y no ganan nada mediante transferencias de electrones. Todos los demás forman compuestos hasta cierto punto, aunque algunos son más activos que otros y algunos se encuentran mucho más frecuentemente. Por ejemplo, el átomo de cloro que visitaste es muy activo. Puede formar compuestos con el átomo más simple, el hidrógeno, que emplea en total sólo un electrón, y también con el mayor elemento natural, el uranio. Éste es verdaderamente un gran establecimiento. Emplea casi cien electrones, pero sólo los del nivel externo de valencia afectan realmente a su comportamiento químico. Es tan grande que ha habido rumores de que su núcleo es inestable —añadió en plan confidencial.

—Deseaba preguntar acerca de eso —dijo resueltamente Alicia—. Ha mencionado otra vez el núcleo. ¿Me podría decir, por favor, qué es el núcleo?

Todos los electrones parecían en cierta manera incómodos, pero respondieron reluctantemente.

—El núcleo es el dueño oculto del átomo. Nosotros los electrones somos los responsables de formar compuestos químicos, emitir luz desde el átomo, etc., pero es el núcleo el que controla realmente la clase de átomos que somos. Él toma las decisiones políticas finales y

fija el número de electrones que podemos tener y los niveles disponibles para colocarlos. El núcleo contiene la familia nuclear, la organización clandestina de la Carga Organizada.

Alarmados ante esta explosión de franqueza, los electrones de la habitación trataron de retirarse discretamente a una esquina, o al menos tan lejos como pudieron para evitar ser localizados. ¡Demasiado tarde, el daño estaba hecho! Alicia fue consciente de una nueva presencia amenazadora en la cercanía.

Entre los electrones que se escabullían había ahora una figura grande y pesada que surgió por encima de Alicia y sus compañeros. Alicia se dio cuenta de que era un fotón, pero claramente más masivo que ninguno de los que había visto antes. Brillaba como todos ellos, pero de una manera muy peculiar, débil y furtivamente. También observó que, sorprendentemente, por tratarse de algo que era la misma esencia de la luz, este fotón llevaba unas gafas muy oscuras.

—Es un fotón virtual pesado —murmuraron los electrones—. Muy pesado, muy fuera de su capa de masas. Es uno de los agentes ejecutivos del núcleo. Los fotones como él transmiten el control eléctrico del núcleo a sus clientes, los electrones.

—Oigo a alguien hacer preguntas —dijo el fotón en tono amenazador—. Los nucleones son de esa clase de partículas a las que no agrada oír que alguna otra persona hace preguntas. Voy a llevarme a esa misma persona para hacer un pequeño viaje a fin de que conozca a ciertos individuos, o más bien a ciertas partículas. Ellas se mueren por conocerla.



Eso no parecía un comienzo muy alentador de un nuevo encuentro, y Alicia estaba considerando si debía negarse por seguridad. No pudo reconstruir en detalle, al recordarlo después, cómo empezaron el viaje: todo lo que pudo recordar era que corrían uno junto al otro y el fotón no paraba de gritar «más deprisa», y Alicia sentía que no podía ir más deprisa, aunque le faltaba el aliento para decirlo. Se movieron con toda rapidez sobre la superficie de la mesa y se precipitaron dentro de uno de los átomos representados en esa superficie. Era uno de los átomos de uranio y creció enormemente al salir corriendo a su encuentro.

La parte más curiosa de la experiencia una vez que estuvieron dentro del átomo fue que las cosas a su alrededor no cambiaban jamás de posición: por más deprisa que fueran, no parecían dejar atrás nada. Lo que sí notó Alicia fue que su entorno, los atareados electrones y los contornos de los niveles que los contenían, parecían hacerse constantemente *mayores* conforme corría.

—¿Está creciendo todo o estoy yo menguando? —pensó intrigada la pobre Alicia.

—¡Más deprisa! —grito el fotón—. ¡Más deprisa! No intentes hablar.

Alicia tuvo la impresión de que jamás volvería a hablar; estaba quedándose sin aliento, y el fotón siguió gritando «¡Más deprisa! ¡Más deprisa!», y la arrastró consigo.

—¿Estamos cerca de allí? —logró decir finalmente Alicia.

—¡Cerca de allí! —repitió el fotón—. Estamos allí y no en ningún otro sitio todo el tiempo, pero no estamos suficientemente *localizados*, apenas sí lo estamos. ¡Más deprisa!

Corrieron durante algún tiempo en silencio, mientras la escena a su alrededor aumentaba de tamaño, expandiéndose vertical y horizontalmente, hasta que todo lo que había visto antes era demasiado grande para ser apreciado debidamente.

—¡Ahora! ¡Ahora! —gritó el fotón—. ¡Más deprisa! ¡Más deprisa! Tu momento ahora es casi lo bastante grande como para que se te pueda localizar dentro del núcleo.

Iban tan deprisa que parecían deslizarse por el aire, hasta que de repente, justo cuando estaba completamente exhausta, Alicia se encontró frente a una elevada torre oscura que se levantaba ante ella, curvándose desde sus cimientos y estrechándose constantemente con la altura. Era oscura y monótona en los niveles inferiores, aunque pudo ver en ciertos lugares de su cima una confusa mezcolanza de torretas y almenas. El efecto global le pareció imponente al máximo.

—Ahí tienes el Castillo Rutherford, el hogar de la familia nuclear —dijo el fotón virtual pesado.

Capítulo 8
El Castillo Rutherford

Alicia se detuvo a contemplar las oscuras torres del Castillo Rutherford, que asomaban frente a ella.

—¿De dónde ha salido eso? —preguntó a su acompañante—. ¿Cómo hemos llegado hasta aquí desde el pozo de potencial del átomo?

—He de decirte que no hemos empleado ningún tiempo en ir a ningún sitio. Permanecemos estrictamente en la vecindad del átomo, pero ahora estamos algo, o verdaderamente bastante más que algo, localizados en su centro. Lo que ves frente a ti es el fondo del mismo pozo de potencial. ¿No lo reconoces?

—¡Claro que no! —replicó enfáticamente Alicia—. El pozo de potencial era un *pozo*; era un agujero que iba hacia abajo. Esto es una torre que va hacia arriba. Algo completamente diferente.

—No es tan diferente cuando lo piensas —repuso el fotón—. El núcleo produce un campo eléctrico positivo, y el mismo núcleo proporciona una energía potencial negativa a todos los electrones que están en la vecindad. Cuando estás en compañía de electrones y demás, ves naturalmente el potencial como un pozo que va hacia abajo. Las partículas nucleares como los protones llevan carga positiva siempre, así que si tipos como ésos nos hicieran una visita inesperada, se expondrían a encontrar que su energía potencial crece, y no poco, cuando se acercan al núcleo. Esto usualmente hará que personajes así mantengan una educada distancia, y el campo actúa como una barrera. De hecho, por esta razón se la

denomina «barrera coulombiana». Los nucleones detestan recibir visitantes no invitados. Si te juntas con personajes de esa clase, verás lo que ellos ven, un alto muro de potencial alrededor del núcleo.



En el centro de cada átomo hay un pequeño núcleo atómico, el cual contiene la mayor parte de la masa total, aunque mide sólo alrededor de una cienmilésima parte del diámetro de aquél. El núcleo posee carga eléctrica positiva que atrae los electrones cargados negativamente y mantiene unido el átomo. Por otra parte, esta carga positiva repelerá otras partículas cargadas positivamente y proporcionará una barrera alrededor del núcleo, la *barrera coulombiana*, que mantiene a protones y otros núcleos fuera de éste.

—¿Cómo entraré entonces? —preguntó Alicia—. No creo que sea capaz de escalar el muro. Estoy segura de que éste será muy eficaz en mantenerme a una distancia educada —arguyó esperanzada. No estaba en absoluto segura de desear conocer a la familia nuclear.

—La barrera de potencial actúa para mantener fuera solamente aquellas partículas que tienen carga eléctrica positiva. Existen otras que no poseen carga eléctrica alguna, y éstas pueden atravesar fácilmente la barrera. Tú no llevas ahora ninguna carga, de modo que estás autorizada a pasar por la entrada de partículas neutras —señaló hacia una puerta alta en la parte inferior del muro del castillo, que Alicia no había advertido antes y en la que se veía un letrero: «Sólo partículas neutras».

Alicia y su acompañante se dirigieron a la puerta y llamaron con fuerza.

—¿Qué aspecto tienen las partículas nucleares? —preguntó Alicia con cautela—. ¿Son muy parecidas a los electrones que he conocido?

—Todo el mundo suele considerarlas mayores que los electrones, y se sabe que son unas dos mil veces más masivas.

Esta respuesta de nada sirvió para reducir el nerviosismo de Alicia, sobre todo al oír unos pasos lentos y pausados que desde el interior se aproximaban a la puerta.

Éstos se hicieron más sonoros, hasta tal punto que imaginó que podía sentir temblar el suelo ligeramente tras cada pisada. Al final pararon y la puerta empezó a abrirse con lentitud.



Alicia miró nerviosamente a fin de obtener una primera visión de ese monstruo que había requerido su presencia. Al fin la puerta se abrió del todo y siguió sin ver nada. ¿Eran los nucleones invisibles?

—Aquí estoy —tronó una voz irritada, desde algún lugar por debajo del nivel de las rodillas de Alicia. Sorprendida, miró hacia abajo y allí, de pie enfrente de ella, había una pequeña figura. No era muy distinta de los electrones que había visto antes, salvo que la rodeaba un aura de energía y, como el acompañante de Alicia, llevaba gafas oscuras. Sin embargo, recordando cuánto se había reducido ella en el camino hasta el Castillo Rutherford, se dio cuenta de que esta figura debía de ser muchísimo más pequeña de lo que le habían parecido antes los electrones.

—¡Creía que me había dicho que los nucleones eran mayores que los electrones! —exclamó, dirigiéndose indignada al fotón. Estaba enfadada por haber sido engañada de esa manera.

—¡Claro!, los ciudadanos más informados están de acuerdo en que son mayores y estoy seguro de que no deseas poner en duda mis palabras por algo tan poco importante. Desde luego los nucleones son mucho más pesados que los electrones y por tanto tienden a estar más localizados que éstos. Como son dos mil veces más pesados, naturalmente tienen dos mil veces más energía en reposo, y hay un amplio consenso en que se hallan en una región dos mil veces más localizada, incluso aunque tengan la misma energía que un electrón. Esto significa que son propensos a ocupar menos espacio y por ello *parecen* más pequeños que los electrones, pero la opinión informada es que son realmente mayores.

»En comparación con los ciudadanos del núcleo, los electrones atómicos son unos individuos que no tienen prácticamente energía ni momento y en modo alguno están bien localizados. Forman considerables nubes electrónicas que rondan por la vecindad del núcleo y que son verdaderamente muy grandes. Se extienden en un volumen que es centenares de miles de veces mayor que el del propio núcleo.

Al mirar a su alrededor, Alicia pudo ver que los rodeaban grandes nubes grises que se extendían hasta donde alcanzaba la vista. Resultaba extraño pensar que ésos eran los electrones que antes había visto, pero ahora contemplados desde una perspectiva con una escala mucho más condensada.

El neutrón (pues eso era lo que los había recibido) se estaba impacientando por momentos con esa conversación.

—No os quedéis ahí, quienes quiera que seáis —les espetó en tono de reproche—. Acercaos para que pueda identificaros.

—¡Vaya!, no puede vernos —observó Alicia—. Creo que es ciego.

—Todos los neutrones lo son, y así lo cree la mayoría de la gente —replicó su acompañante—. Esas partículas no son de las que interactúan con los fotones, o apenas sí lo hacen, al no poseer carga eléctrica. Los neutrones no están sujetos a ningún tipo de interacción de largo alcance, y son propensos sólo a interacciones de muy corto alcance. Un individuo de éstos no reconoce a los demás hasta que están tan cerca que los puede tocar.

Se acercaron al neutrón hasta que éste se topó con ellos.

—¡Ah, estás aquí! —exclamó ásperamente—. Entra para que pueda cerrar la puerta. Se está mucho mejor dentro.

Ignoró al fotón, de cuya existencia apenas era consciente. Alicia observó con interés que el fotón había desaparecido entre las fortificaciones del castillo, que después de todo estaban construidas con los fotones virtuales emitidos por la carga del núcleo. Siguió al neutrón hasta el interior del castillo por un corredor de piedra tosca. Ese pasillo era muy estrecho, pero parecía estar forzado a ensancharse cuando ellos pasaban, de modo que siempre había el sitio justo para cruzarlo. Alicia encontró muy extraño este comportamiento, pero nunca estaba suficientemente segura de lo que sucedía como para hacer comentario alguno. Ahora que lo había conocido, el nucleón al que seguía no le parecía tan amenazador como había temido. Impaciente sí, pero de ningún modo *siniestro*. Le recordaba a un tío lejano suyo.

Entraron juntos en una alta cámara abovedada de piedra desnuda. Las paredes se elevaban escarpadamente a los lados y desaparecían en las sombras del techo. En lo alto de las paredes se veían entradas en arco que conducían a diversos niveles superiores y que recordaban vagamente los niveles de energía de los electrones que había visto Alicia fuera, en el átomo. El suelo ocupaba un área de tamaño moderado y estaba lleno de partículas, todas las que podía contener, pero cuando Alicia entró con su acompañante observó claramente que las macizas paredes de piedra se replegaban ligeramente a fin de crear justo el espacio extra necesario para acomodar a los nuevos ocupantes.

Alicia estaba completamente segura de lo que había visto en esta ocasión e hizo un comentario sobre el movimiento de las paredes.

—Ése es el efecto del campo autoconsistente en el interior del castillo —se le dijo—. Como sucede con los electrones y todas las demás partículas, *nosotros* los nucleones hemos de ocupar estados cuánticos, y los estados disponibles aquí están controlados por el pozo local de potencial. En el caso de los electrones del átomo, nosotros proporcionamos ese potencial. Los estados de los electrones vienen fijados por el potencial eléctrico, y nosotros controlamos ese potencial. El átomo es nuestro territorio, y la energía potencial de los electrones en su interior está controlada por su distancia respecto a la carga positiva de los protones del núcleo central. Por medio del potencial eléctrico producido por esta carga, nosotros, ocupantes del núcleo, controlamos los estados de los electrones, y los electrones deben colocarse en ellos como mejor

puedan. En nuestro caso, la situación es diferente. Nosotros mismos suministramos el potencial para nuestros propios estados nucleares.

—Si ustedes suministran el potencial en ambos casos, seguramente esto hace que los dos casos tengan que ser iguales —protestó Alicia.

—No, los hace muy diferentes. Mira, en el átomo la mayor parte del potencial la proporciona el núcleo, así que éste controla los estados aunque los mismos nucleones no hagan uso de ellos. El potencial controla los estados que dan las distribuciones de probabilidad de los electrones, pero los electrones que las usan tienen muy poco efecto sobre el potencial. El potencial atómico es esencialmente el mismo, estén los electrones donde estén.

»Por otra parte, en el caso del núcleo, el potencial en el que ahora nos hallamos está producido por el efecto colectivo de los nucleones en el interior de aquél. Nosotros tenemos un sistema muy democrático, aunque gobernamos de forma autocrática a los electrones. Nuestro potencial colectivo fija los estados disponibles para que los ocupemos los nucleones y por consiguiente controla nuestras distribuciones de probabilidad. Esta distribución controla, en consecuencia, el potencial, como dije al principio. Es un círculo vicioso, como podría esperarse de la familia nuclear, y puedes ver que los estados que habitamos cambiarán de forma natural al cambiar la distribución de nucleones.

—¿Se crea el nuclear potencial por la misma carga eléctrica que origina el que actúa sobre los electrones? —preguntó Alicia, que creía que debería tener claro ese punto.

—¡Oh, no!, completamente al revés, de hecho. Toda la carga total del núcleo la llevan los protones. Tienes que ver algunos protones por ahí —señaló hacia las partículas cercanas. Alicia dirigió su mirada hacia allí y pudo ver más neutrones, que se parecían totalmente a su acompañante. Esparcidas entre ellos había algunas partículas con un aspecto mucho más agresivo. Si los neutrones habían sido ligeramente irritables, éstas parecían hallarse en un estado de furia apenas contenida—. Todos los protones llevan cargas positivas, y las partículas que tienen cargas del mismo signo se repelen, ¿sabes? Los protones están siempre enfadados unos con otros y amenazando con irse por ahí. Es muy difícil mantenerlos juntos, te lo aseguro.

—¿No tienen los electrones un problema análogo? Yo creo que lo tienen. Si todos los electrones tienen carga eléctrica negativa, dos cualesquiera de ellos tendrán la misma carga y deberían repelerse.

—Eso es absolutamente cierto; se repelen. No obstante, tienes que darte cuenta de que los electrones se hallan relativamente dispersos y difusos, y sus cargas están ampliamente separadas, de modo que la repulsión que éstas producen es muy débil. La fuerza atractiva de la carga positiva del núcleo es capaz de mantenerlos unidos. Los protones del núcleo están amontonados de manera muy compacta, así que su fuerza repulsiva es muy intensa. Las fuerzas eléctricas amenazan con desgarrar el núcleo.



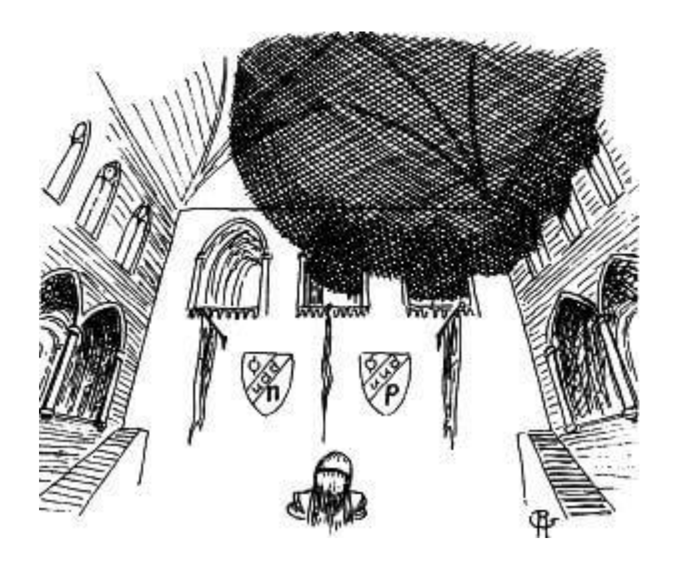
—En tal caso, ¿qué los mantiene a ustedes unidos? —preguntó Alicia con toda razón.

—Eso lo consigue una fuerza completamente distinta, una fuerza fuerte[9]; de hecho se la denomina *interacción nuclear fuerte*. La interacción nuclear fuerte es muy potente. Es capaz de superar la disgregadora repulsión eléctrica en el interior del núcleo, aunque no tiene efectos evidentes fuera de éste. Es una fuerza *de corto alcance*. Las fuerzas nucleares dominan dentro del núcleo, pero apenas sí se manifiestan fuera de éste, y todo lo que puede verse es el campo eléctrico producido por las cargas positivas que llevan los protones. Nosotros los nucleones nos mantenemos firmemente unidos a nuestros vecinos inmediatos cuando se hallan dentro de nuestro alcance, pero no notamos realmente la presencia de los que están más lejos en la multitud y tenemos muy poco efecto sobre ellos.

Desde que había entrado a la sala central del castillo, Alicia se sentía bastante incómoda. Ahora experimentaba una sensación particularmente inquietante y tenía la impresión de que había algo nuevo en la habitación. Miró a su alrededor y no pudo ver nada. Miró entonces hacia el techo y percibió confusamente el contorno curvo de una vasta figura redonda que atravesaba las vagas sombras que se cernían sobre su cabeza. Evidentemente era sólo una pequeña parte de algún objeto mucho mayor que parecía vago y tenue, como un fantasma, y que atravesaba las paredes como si éstas no existieran.

---

[9] En español es inevitable la redundancia, que no se produce en inglés (*strong force*). (*N. del T.*)



Alicia dio un grito, y tuvo que describir lo que había visto al neutrón, que por supuesto no había podido verlo.

—¡Ah!, eso será un electrón —dijo—. Ellos ocupan todo el volumen del átomo, ¿sabes?, lo cual significa que pasan a través del núcleo al igual que por cualquier otro sitio. A los electrones no les afecta lo más mínimo la interacción fuerte, así que no notan nuestra presencia al pasar. El núcleo constituye una parte muy pequeña del volumen ocupado por los electrones, de modo que no los vemos mucho por aquí. Bueno, en realidad yo no los veo en absoluto, tú ya me entiendes.

—¿Entonces los fotones no causan esa interacción fuerte? —preguntó Alicia. Le habían dicho que el intercambio de fotones mantenía compactos los átomos, pero había comprendido que ello era debido a la interacción entre cargas eléctricas e intuía que esto era algo completamente distinto.

—Estás en lo cierto, no tiene nada que ver con los fotones. *Está* causada por el intercambio de partículas, como todas las

interacciones, pero involucra a una clase diferente de partículas. La interacción fuerte se origina de hecho por el intercambio de muchas partículas diferentes; de ellas las más conspicuas son las conocidas como piones. Éstas son necesariamente bosones, ya que se crean y se destruyen en el proceso de intercambio. Los piones tienen mucha más masa que los fotones; en realidad, éstos no tienen masa en absoluto, lo que en términos de energía hace muy barata su creación. Los piones tienen una masa unas trescientas veces mayor que la del electrón. No obstante, pueden crearse mediante una fluctuación de energía, permitida por la relación de Heisenberg, pero esa fluctuación debe ser muy grande a fin de suministrar la energía de la masa en reposo del pión, de modo que no puede durar mucho tiempo. Durante el tiempo disponible los piones no pueden alejarse mucho de su fuente, de manera que sólo pueden intercambiarse con partículas que se hallen muy cerca, de hecho casi tocándose. Por consiguiente la interacción fuerte es de muy corto alcance.

En este momento se produjo cierto alboroto. Dos de los protones habían mantenido una violenta discusión y amenazaban con irse cada uno por su lado. Los neutrones se apresuraron a separar a los contendientes y mantenerlos bien apartados, diluyendo así la fuerza de su repulsión mutua. A la vez que los neutrones se agolpaban entre los protones para aumentar su separación, también los agarraban firmemente para poder mantenerlos dentro del núcleo.

—Ya ves que nosotros, los neutrones, somos necesarios para mantener el núcleo unido, en particular los núcleos más grandes —observó un neutrón—. En un núcleo, cada protón repele a los

demás, no sólo a sus vecinos inmediatos, como es el caso de la interacción fuerte. La repulsión aumenta rápidamente con el número de protones en el núcleo, y esto significa que los núcleos pesados, que tienen un gran número de protones, necesitan proporcionalmente más neutrones para mantenerlos lejos entre sí de manera que su repulsión no supere la fuerza de atracción ejercida por sus vecinos inmediatos.

»La familia de los nucleones proviene de dos clanes distintos, los protones y los neutrones. El árbol genealógico que se exhibe en esa pared de ahí muestra cómo se combinan.

Indicó un gran diagrama colgado en la pared, entre otros símbolos diversos y condecoraciones heráldicas. El diagrama mostraba en sus esquinas superiores dibujos grandes y fantasiosos de un protón y un neutrón. Más abajo se enumeraban los diversos núcleos pertenecientes a la familia. Alicia vio que se identificaban mediante las mismas etiquetas que había visto marcando los átomos en el Muelle Mendeléiev. Mirando más de cerca, observó que las etiquetas eran ligeramente distintas: había un segundo número en cada uno de ellos. Ahora los núcleos venían dados como «$_1H^1$», «$_2He^4$», «$_3Li^7$», etcétera.

Del protón y neutrón de la parte superior del diagrama partían líneas hacia los diversos núcleos listados. Había una línea desde el protón hasta el núcleo «$_1H^1$» y ninguna desde el neutrón. Hasta el núcleo «$_2He^4$» llegaban dos líneas desde el protón y dos desde el neutrón. De ahí en adelante muchos núcleos tenían aproximadamente el mismo número de líneas desde el protón y

desde el neutrón. Cuando Alicia miró a la parte más baja de la carta, observó que los núcleos representados allí tenían muchas más líneas de neutrones que de protones.

—Esa carta muestra cómo los dos clanes de nucleones pueblan los diferentes núcleos. El primer número nos indica la cantidad de protones en juego. Ésta coincide con el número de electrones que pueden ser controlados y por lo tanto es la que decide las propiedades químicas del átomo. El segundo número expresa la cantidad total de nucleones que pueblan un determinado núcleo.

»Los núcleos más ligeros tienen el mismo número de protones que de neutrones. Por ejemplo, un núcleo de carbono contiene seis protones y seis neutrones. La repulsión que proporcionan seis protones, cada uno de ellos repelido por los otros cinco, no es aún suficiente para superar la atracción causada por la interacción fuerte. Por otra parte, aquí nuestro núcleo de uranio tiene 92 protones. La fuerza repulsiva entre todos los pares diferentes de protones es ahora muy grande, de manera que se necesita un número relativamente elevado de neutrones para mantener los protones separados y atenuar su repulsión eléctrica. En nuestro núcleo tenemos nada menos que 143 neutrones. El número de neutrones no es necesariamente igual para todo núcleo de uranio. En un elemento dado, el número de protones es siempre el mismo, puesto que éste fija el número de electrones y por tanto el comportamiento químico, pero el número de neutrones no influye mucho en la química del átomo y puede variar ligeramente de un núcleo a otro. Los núcleos de un elemento con diferentes números

de neutrones se conocen como *isótopos*. Tenemos 143 neutrones en este núcleo, como dije, pero muchos núcleos de uranio tienen 146, lo que los hace algo más estables.

—Ya he oído antes algo acerca de la estabilidad —dijo Alicia—. Pensaba que los átomos eran completamente inmutables y que, aunque pudieran participar en diferentes compuestos, ellos mismos eran eternos.

—No del todo. Las paredes del pozo de potencial nuclear sirven para mantenernos dentro a nosotros, así como la barrera coulombiana mantiene fuera a otros protones. En ocasiones, sin embargo, hay penetración, y el núcleo cambia de alguna manera. Esto funciona en ambos sentidos; las partículas del exterior del núcleo pueden penetrar en él, o algunos de nuestros colegas pueden intentar escapar.

»La razón por la cual los protones y neutrones permanecen en el núcleo es la misma que la que hace a los electrones permanecer en el átomo: se requiere menos energía que si estuvieran fuera. El defecto de energía respecto al valor que tendrían si estuvieran fuera se denomina *energía de enlace* o *de ligadura*. Existen niveles de energía para los nucleones dentro del núcleo de manera muy parecida a lo que ocurre con los electrones en el átomo, y, como los neutrones y los protones no son idénticos, tales niveles pueden llenarse de protones y de neutrones independientemente. Puesto que el proceso de llenado es igual para neutrones y protones, los núcleos estables tienden a tener cantidades iguales de ambos tipos. En los núcleos más pesados, que contienen mayor cantidad de

protones, la proporción de neutrones es más alta, como ya he explicado. Para todos los núcleos existe un cociente del número de protones sobre el de neutrones que da el átomo más estable. Un exceso de cualquiera de ellos producirá una tendencia a la inestabilidad y a alguna forma de desintegración. Debo admitir que en el uranio la repulsión entre los protones es tan grande que el núcleo es apenas estable en el mejor de los casos. Cualquier desbaratamiento del equilibrio entre protones y neutrones podría muy bien ser desastroso.

De repente sonó un clarín de alarma y una voz estridente se repitió a lo largo y ancho de la cámara abovedada.

—¡Alerta! ¡Alerta! Situación Alfa. Hay un intento de fuga en marcha.

En núcleos grandes con muchos nucleones la repulsión entre todos los protones se hace proporcionalmente más fuerte y tales núcleos pueden ser *inestables*. Pueden sufrir una *desintegración* radiactiva en la que el núcleo emite una partícula α (alfa), que es un grupo compacto de dos protones y dos neutrones que atraviesan la barrera coulombiana. Los neutrones pueden sufrir también la desintegración β (beta), en la que se crea un electrón dentro del núcleo que inmediatamente se escapa de éste porque a los electrones no les afecta la interacción fuerte. Los núcleos también emiten rayos γ (gamma), que son fotones de alta energía.

Alicia miró a su alrededor a ver si podía descubrir la causa de esa alarma. Nada parecía haber cambiado. Había un movimiento considerable entre los nucleones congregados, pero éstos, como las demás partículas que había encontrado, siempre se hallaban en continua agitación, de modo que eso no era nada nuevo. Cuando observó con cuidado, se dio cuenta de que un pequeño grupo de partículas, dos protones y dos neutrones, se movían a través de la multitud, manteniéndose estrechamente unidos. Se precipitaron hacia la pared, chocaron con ella, rebotaron y corrieron rápidamente a través de la habitación para chocar con la pared opuesta. Alicia tuvo el vívido recuerdo de la persona que había visto que intentaba penetrar en su habitación cerrada cuando llegó al País de los Cuantos.

Comentó esto a su acompañante y éste replicó:

—Lo que estás describiendo es el agolpamiento en partículas alfa. Una partícula alfa es un grupo de dos protones y dos neutrones que se enlazan tan estrechamente que actúan como una sola partícula. Como contiene dos protones, la partícula alfa es repelida por la carga total positiva de los protones e intenta escapar, pero se lo impide el muro en torno al núcleo. El grupo trata de «tunelear» a través de dicho muro. Planean escapar mediante penetración de barrera, y desde luego, antes o después, lo conseguirán.

—¿Cuánto tiempo es probable que les cueste hacerlo? —preguntó con curiosidad Alicia.

—Unos cuantos miles de años, diría yo.

—¿No cree que entonces es algo prematuro hacer sonar la alarma? —inquirió Alicia—. ¡Me parece que disponen de un montón de tiempo para tratar esta fuga sin caer en el pánico!

—¡Ah!, pero no podemos estar seguros de eso. *Probablemente* les costará miles de años escaparse, pero *podrían* hacerlo en cualquier momento. No hay manera de estar seguro; es todo una cuestión de probabilidad.

—¿Se producen entonces todos los escapes del núcleo por penetración de barrera? —preguntó Alicia.

—No todos. La emisión alfa es por penetración de barrera, como acabo de decir. También tenemos emisiones beta y gamma, y ninguna de ellas requiere penetración de barrera.

—¿Entonces qué son? —preguntó obligadamente Alicia. Sospechaba que se lo iban a decir preguntara o no, pero preguntar parecía más educado.

—La emisión gamma es emisión de fotones, muy parecida a la que se obtiene de los electrones en los átomos. Cuando un electrón ha sido excitado a un estado más alto y luego vuelve a caer al más bajo, emitirá un fotón que se lleva la energía liberada. Lo mismo sucede cuando una excitación del núcleo recoloca los protones: se emite un fotón cuando el núcleo retorna al estado de energía más bajo. Como generalmente las energías de interacción en el núcleo son mucho mayores que en el átomo, los fotones gamma tienen una energía mucho mayor que la de los procedentes de electrones atómicos. En realidad tendrán cientos de miles de veces más energía, pero siguen siendo fotones.

»La emisión beta es la emisión de un electrón desde el núcleo —continuó diciendo su informador.

—Creí que había dicho que no había electrones en el núcleo —protestó Alicia—. Usted dijo que los electrones no sentían la interacción fuerte y sólo se dejaban caer en ocasiones por aquí.

—Eso es completamente cierto. No hay electrones en el núcleo.

—Si el núcleo no puede sujetar a los electrones y no existen electrones en el núcleo —dijo pacientemente Alicia—, ¿cómo puede escaparse uno de él? Eso no tiene ningún sentido: para empezar, no puede escaparse si no está allí.

—Es precisamente porque el núcleo no puede sujetar a los electrones por lo que éstos se escapan de él tan pronto. Los electrones se producen en el interior del núcleo en una interacción débil, y como éste no puede sujetarlos, se escapan, por supuesto, de inmediato. Es muy sencillo cuando se piensa en ello —dijo amablemente el neutrón.

—Puede ser —dijo Alicia, que tenía la impresión de que todavía no estaba nada claro— pero ¿qué es una interacción débil? ¿Cómo los electrones...?

De nuevo sonó un clarín y un heraldo en algún sitio de la parte superior de la cámara gritó:

—¡Atención todo el mundo. El castillo está siendo atacado! Estamos sitiados por un plasma caliente de partículas cargadas.

—¡Oh, Dios mío! —exclamó Alicia—. Esto parece serio.

—No lo es, realmente —replicó tranquilizadoramente un neutrón cercano—. No es probable que ninguna de las partículas cargadas

del plasma tenga suficiente energía para hacer brecha en nuestras defensas. Ven a verlo.

Condujo a Alicia a través de diversas galerías y niveles de energía dentro del castillo hasta llegar a una posición desde la que Alicia podía contemplar el exterior. Vio otros castillos nucleares en la lejanía y, esparcidos en la llanura, un número de protones que se movían rápidamente por ella.

—Esos protones son de un plasma caliente —le dijo su acompañante—. En un plasma los átomos han perdido algunos de sus electrones y se han convertido en iones positivos con una carga global positiva. El núcleo de hidrógeno contiene un único protón, así que cuando un átomo de hidrógeno pierde su electrón, no queda nada salvo un protón. Los plasmas pueden llegar a estar muy calientes, y entonces los protones se precipitan por ahí con un montón de energía, pero no la suficiente para entrar aquí —acabó con aire de satisfacción.

Alicia observó cómo algunos protones llegaban corriendo hacia un núcleo y subían por la base curva de su pared. Al ir subiendo se movían cada vez más lentamente porque perdían su energía cinética, de modo que finalmente se paraban tras un corto camino de ascensión por la pared. Desde ese punto se deslizaban de nuevo hacia abajo y salían precipitadamente en una dirección diferente de aquella en la que habían venido.

—Puedes ver, aunque yo no pueda, que no tienen éxito alguno en su empeño de entrar —continuó diciendo el guía de Alicia.

—¿No podrían entonces entrar mediante penetración de barrera? —preguntó Alicia.

—Bueno, sí. Podrían *en principio*, pero están tan poco tiempo cerca del núcleo que realmente es muy poco probable.

En este momento Alicia notó una perturbación a lo lejos. Algo se acercaba a una velocidad más que notable.

—¿Qué es eso que se aproxima? —preguntó con bastante ansiedad.

—No tengo ni idea —respondió el neutrón—. ¿Se acerca algo?

Alicia se dio cuenta de que el neutrón naturalmente no notaba la aproximación de la rápida partícula cargada que venía galopando, arrastrando un penacho de fotones apenas vistos en su paso como un torbellino. Al tiempo que Alicia describía su aspecto al neutrón, la trayectoria del recién llegado topaba con un castillo. Con aparentemente muy poca reducción de su loca marcha, se lanzó hacia la barrera y la cruzó por encima. Un instante después, Alicia lo vio galopando a lo lejos, aparentemente muy poco afectado por este encuentro. No podía decirse lo mismo respecto al núcleo en el que había entrado, pues había quedado hecho pedazos, y grandes partes de él salieron volando en diferentes direcciones. Alicia completó su descripción de lo ocurrido.

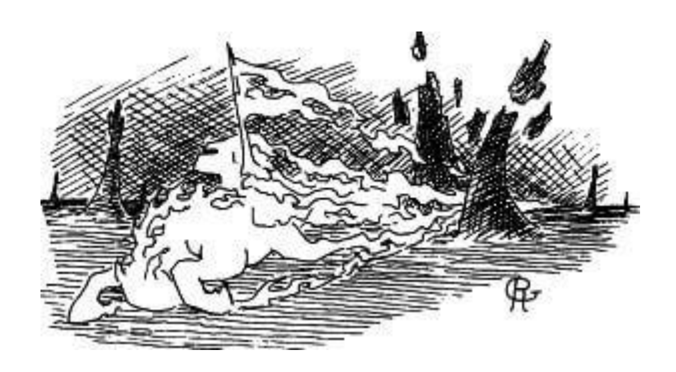
—¡Ah!, eso sería un «jinete cósmico»[10]. En muy raras ocasiones vemos pasar alguno. Proceden de algún lugar fuera de nuestro mundo y poseen una energía enorme. Para ellos la energía necesaria para atravesar la barrera coulombiana es una fruslería, y es como si

---

[10] El autor hace aquí un juego de palabras intraducible. A partir de «rayo cósmico» (*Cosmic Ray*), introduce *Cosmic Rayder*, que en inglés suena como *Cosmic Rider* («jinete cósmico»). (N. *del T.*)

no hubiera barrera en absoluto. No tenemos ninguna defensa contra ellos, pero, como ya he dicho, afortunadamente son muy raros.

Mirando hacia el área de fuera, Alicia pudo distinguir una cuantas figuras silenciosas que se movían muy lentamente y con cautela.



—¡Oh, mire! —exclamó olvidándose de quién era su acompañante—. Por allí se mueven algunos neutrones.

—¿Qué? —exclamó el neutrón a su lado—. ¿Estás segura? Esto es serio. Ven, debemos bajar a la sala principal enseguida.

Hizo bajar apresuradamente a Alicia a través de los sucesivos niveles de energía hasta la sala donde había entrado al principio, pasando por alto su protesta de que no había muchos neutrones fuera y que, en realidad, no tenían en absoluto mucha energía.

Apenas habían llegado cuando un neutrón invasor entró de sopetón a través de la pared y se paró en medio de la sala encima de las demás partículas. No era uno de los ocupantes usuales del núcleo, sino uno de los neutrones que habían entrado desde el exterior. Alicia recordó que el fotón virtual le había dicho que la barrera coulombiana no tenía ningún efecto sobre las partículas neutras y

que ella misma había penetrado la barrera sin dificultad. Del mismo modo ese neutrón había entrado sin invitación.

Se produjo de inmediato un gran bullicio y un estado de pánico entre todos los nucleones. Corrían consternados precipitadamente adelante y atrás, yendo desde una galería a la siguiente, anunciando que la estabilidad del núcleo había sido totalmente trastornada por la adición de ese neutrón extra. Al tiempo que se movían apresuradamente hacia adelante y hacia atrás, Alicia se alarmó mucho al descubrir que toda la habitación era agitada con violencia por efecto de simpatía. Las macizas paredes de piedra temblaban como una vibrante gota de líquido. Si en cierto momento la habitación era cuadrada y compacta, un instante después era muy larga y estrecha. Un cuello estrecho se formó en el centro, cerca de donde se hallaba Alicia, de manera que la habitación casi se dividió en dos. Las paredes se mecían adelante y atrás, y cada vez la habitación se iba estrechando más en su punto medio. La habitación se estiró por última vez.

El potencial eléctrico del núcleo proporciona una barrera coulombiana que repele las partículas cargadas positivamente. Los protones de baja energía son incapaces de pasar por encima de esta barrera; aunque podrían en principio pasar *a través* de ella mediante «penetración de barrera», la probabilidad de esto es baja porque están «de paso» y sólo tienen una interacción efímera con el núcleo.

Algunas partículas de la radiación cósmica tienen bastante energía para superar la barrera y pueden atravesarla fácilmente, depositando en el núcleo suficiente energía para romperlo por completo.
Los neutrones no poseen carga eléctrica, así que para ellos no existe la barrera. Un neutrón que acierte a chocar con un núcleo puede atravesarlo sin dificultad.

Alicia vio cómo las paredes más lejanas se alejaban aún más en direcciones opuestas, mientras que las paredes más próximas se acercaban como si fueran a aplastarla junto con las partículas de su vecindad. Previamente el movimiento se había invertido siempre antes de que el hueco entre las paredes se cerrara, pero esta vez las paredes chocaron, justamente donde permanecía Alicia con unos cuantos neutrones.

* * * *

Cuando las paredes hubieron pasado a través de ella, Alicia descubrió que se hallaba otra vez en la llanura de fuera del castillo. Dirigió a éste la mirada y vio que estaba partido por una fisura que corría desde su base hasta la mitad del mismo. Mientras lo observaba, el castillo se desgarró en dos medias torres que cayeron por separado. Cada una de ellas se agitaba con violencia, y su superficie externa vibraba frenéticamente como una bolsa llena de

gelatina. Fotones de alta energía salían despedidos de los dos castillos puesto que ambos se repartían la energía sobrante. El temblor desapareció gradualmente y ambas formas irregulares desembocaron en la encumbrada forma que había visto al principio. Ante ella aparecían ahora dos copias más pequeñas del Castillo Rutherford, sólo que no estaban quietas, sino que se apartaban con rapidez una de la otra debido al efecto de la carga positiva que habían compartido previamente.

«¡Menos mal que todo ha acabado! Era realmente aterrador», se dijo Alicia. Mientras miraba el ahora tranquilo paisaje, pudo ver unos cuantos neutrones que habían sido expulsados con ella del castillo cuando éste se partió en dos. Los neutrones estaban dispersos por la llanura, y corrían apresuradamente en direcciones arbitrarias. Al tiempo que los observaba, uno de ellos llegó por casualidad hasta el distante contorno de otro castillo nuclear y rápidamente se coló en él por su costado.

Durante un corto intervalo de tiempo nada pareció suceder. Pero poco después pudo ver cómo este castillo también empezaba a agitarse. La agitación aumentó hasta que de repente el castillo se partió por la mitad.

—¡Oh, no! —exclamó Alicia con desánimo al ver las dos mitades alejarse entre sí, escupiendo fotones energéticos. Pasando casi inadvertido, un nuevo grupo de neutrones se alejó corriendo de la escena de la catástrofe.

No había pasado mucho tiempo cuando un par de neutrones que vagaban por la llanura entraron por casualidad en otros núcleos. De

nuevo se repitió el proceso, y una vez más los núcleos acabaron divididos, entraron más rayos gamma en escena y fueron emitidos más neutrones para vagar aturdidos por los alrededores. El proceso se repitió muchas veces. Pronto hubo cuatro núcleos que padecían la angustia de la división; después diez, veinte, cincuenta... Alicia podía ver castillos nucleares desintegrarse en una ardiente fisión, mientras que por encima la escena brillaba con la intensa y vívida radiación luminosa de fotones de alta energía.

—¡Esto es terrible! —exclamó horrorizada Alicia—. ¿Qué puede estar sucediendo?

—No te preocupes, Alicia —dijo una voz calmada a su lado—. Es sólo una fisión nuclear inducida. Una reacción en cadena, ¿sabes? No es nada que deba preocuparte. Simplemente permaneces en medio de lo que, en tu mundo, se llamaría una explosión nuclear.



Alicia se dio la vuelta y vio los rasgos apacibles del Mecánico Cuántico.

—No debes preocuparte —insistió—. Las energías en juego en una reacción de fisión son menores que las que has encontrado dentro del mismo núcleo. El único problema es que ya no están recluidas en el interior del núcleo. Te he estado buscando —continuó diciendo con calma— porque tengo que darte una invitación.

Le ofreció a Alicia una rígida tarjeta de invitación grabada con adornos.

—Es una invitación para la MAScarada[11] de las Partículas, una fiesta que se hace para todas las partículas elementales —dijo.

Algunos núcleos pueden fragmentarse en dos más pequeños y más estables en un proceso conocido como *fisión nuclear*. Este proceso puede ser originado por la adición de un neutrón extra, al que la barrera coulombiana no mantiene fuera del núcleo y que es «lo que le faltaba» a un núcleo ya inestable. La fisión puede liberar otros cuantos neutrones, lo cual conduce a una *reacción en cadena*.

[11] El autor utiliza la palabra (inexistente) *MASSquerade*, por *masquerade* («baile de máscaras» o «de disfraces»), a fin de hacer un juego de palabras con el término *mass* («masa»), ya que todo está referido a partículas. Se empleará MAScarada para poder seguir de algún modo la «broma» del original. (*N. del T.*)

Capítulo 9
La MAScarada de las Partículas

Alicia agarró su invitación y subió por los anchos escalones de piedra que conducían a la alta puerta barnizada. No pudo recordar cómo había llegado hasta allí, aunque sí recordaba que le habían dado una invitación.

«Espero que éste sea el sitio de la MAScarada, sea eso lo que sea —se dijo dándose ánimos—. Parece que siempre acabo encontrándome en donde se desea que esté.»

Se detuvo frente a la puerta y la examinó. Su pintura era muy pulida y lustrosa, de un color rojo vivo. Tenía una manecilla brillante y una aldaba de bronce igualmente brillante en forma de rostro grotesco. Estaba cerrada con llave. Por el ojo de la cerradura emergía una placentera luz de velas y Alicia podía oír la estridente música que se tocaba dentro.

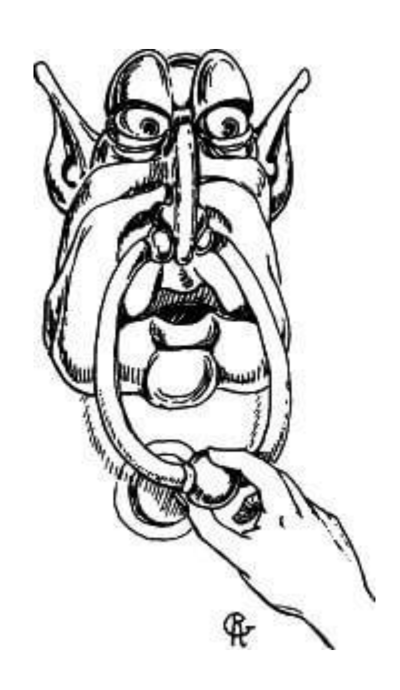
¿Cómo iba a entrar? La respuesta parecía bastante evidente, así que agarró la aldaba y llamó con fuerza.

—¡Ay! ¡Cuidado! —oyó gritar angustiosamente a alguien cerca de ella, muy cerca, de hecho. Sorprendida, Alicia dirigió la vista hacia la puerta y se encontró con la mirada furiosa de un airado llamador—. ¡Eso era mi nariz! —exclamó indignado—. ¿Qué deseas de todos modos?

—Lo siento de veras —dijo Alicia—, pero creí que, como usted *es* un llamador, podría usarlo para llamar a la puerta. ¿Cómo voy a entrar si no llamo? —preguntó lastimeramente.

—Llamar no sirve para nada —dijo arrogantemente el Llamador—. Hacen tanto ruido ahí dentro que nadie podría oírte. —Y era verdad que dentro se estaba armando un montón de ruido: un zumbido de conversaciones, alguien hablando por encima de las otras voces, pero sin poder oírsele del todo a través de la puerta y, por encima de todo, el sonido de la música.

—¿Cómo voy a entrar entonces? —preguntó algo frustrada Alicia.



—¿De veras vas a entrar? —dijo el Llamador—. Ésa es la cuestión principal, ¿sabes?

Sin duda lo era, pero a Alicia no le agradaba que se le dijera. «Es realmente espantosa —murmuró para sí— la manera de discutir de todo el mundo.» Levantando la voz se dirigió al Llamador, aunque se sentía un poco cohibida hablando con un llamador.

—Tengo una invitación —dijo, poniéndosela a éste delante de sus narices.

—Ya veo —replicó el Llamador—. Es una invitación para la MAScarada de las Partículas, que es una función sólo para partículas. ¿Eres tú una partícula?

—No estoy segura de saberlo —afirmó Alicia—. No creía que lo fuera, pero con todo lo que me ha sucedido estoy empezando a pensar que debo de serlo.

—Bien, permíteme ver si cumples los requisitos —dijo el Llamador, con un tono bastante más agradable ahora que su nariz parecía estar bien—. Permíteme consultar un momento mis notas. —Alicia no entendía cómo un llamador podía tener notas, y mucho menos mirarlas, pero tras una corta pausa el Llamador siguió hablando—. ¡Ah, sí! Aquí está la lista de especificaciones para definir una partícula.

»Uno —leyó—. Cuando eres observada, ¿se te observa de forma invariable en una posición razonablemente bien definida?

—Sí, así creo, por lo que sé.

—Espléndido —dijo el Llamador animándola.

»Dos. ¿Tienes una única y bien definida masa? Aparte de las fluctuaciones normales, por supuesto.

—Bueno, sí. Mi peso no ha cambiado mucho desde hace algún tiempo. —Eso es lo que creía Alicia en cualquier caso.

—Bien. Ése es un requisito importante. Las diversas partículas tienen su masa concreta. Ésta es una de sus características más distintivas. Y resulta muy útil a la hora de distinguirlas.

Alicia se impresionó mucho con la idea de que pudiera identificarse a la gente pesándola y no mirándola a la cara, pero se daba cuenta

de que las partículas no tenían nada definido que pudiera considerarse como cara.

—Tres. ¿Eres estable?

—¿Perdón? —dijo Alicia, sintiéndose sin duda ofendida.

—He dicho: «¿Eres estable?». Es una pregunta bastante sencilla. O al menos debería serlo: el requisito se ha hecho cada vez más confuso en los últimos tiempos. Solía significar simplemente: «¿Te desintegras en alguna otra cosa?». Si probablemente fueras a desintegrarte en algún instante en el futuro, serías inestable, y eso era todo. ¡Pero no era suficientemente preciso! La gente empezó a decir: «No podemos asegurar que algo viva eternamente, así que un estado definido que exista durante un tiempo suficientemente largo puede clasificarse como una partícula». Entonces la cuestión es: ¿qué se considera «suficientemente largo»? ¿Años, segundos o qué? Por el momento se aceptan vidas medias de menos de una cienbillonésima de segundo para ser estable —acabó con disgusto—. Así que ahora debo preguntarte: ¿esperas sobrevivir después de una cienbillonésima de segundo?

Existen muchas partículas que interactúan fuertemente además del protón y del neutrón. No es nada fácil distinguir un tipo de partícula de otro. Algunas tienen cargas eléctricas diferentes, pero hay muchas con la misma carga. Las partículas se distinguen en la práctica midiendo sus masas, que las diferencian bastante bien. Muchas de las partículas

son inestables en cierto grado: una partícula más pesada se desintegra en otras más ligeras. Fuera de un núcleo, el neutrón es inestable, con una vida media de unos veinte minutos.

—¡Oh, sí! Así lo creo —contestó Alicia con seguridad.

—Bien, entonces puedo contarte como una partícula estable. Mejor pasa adentro. Puede que no tengas nada mejor que hacer que rondar por aquí, pero yo sí —gruñó el Llamador. Sonó un clic y la puerta se abrió de par en par. Alicia no perdió tiempo en atravesarla.

Ya dentro, caminó a través de un elegante vestíbulo, con claras paredes artesonadas, lámparas de araña y nichos con estatuas. Como todas ellas eran estatuas de partículas notables, era difícil para Alicia apreciar los detalles. Pensó que era bastante inteligente la manera en que se las había arreglado el escultor para hacer que los rasgos de una estatua parecieran tan vagos y difusos. De hecho, para los no iniciados, se parecían mucho a piezas informes de piedra.

Cruzando el vestíbulo, Alicia entró en una habitación grande, que parecía ser un salón de baile. Estaba iluminada por arañas ornamentales que colgaban del techo, pero no daban mucha luz y la habitación estaba casi a oscuras. Las sombras se hacían más intensas en contraste con unas cuantas manchas luminosas que se extendían por la sala. Una de ellas se paró produciendo un círculo

luminoso justo enfrente de Alicia. En el centro de este círculo daba brincos una figura ataviada como el comodín de una baraja de naipes. Su ridículo traje exhibía alegres bandas rojas, azules y verdes. Mirándolo de cerca, Alicia vio que también tenía bandas *antirrojas*, *antiazules* y *antiverdes*. Ella no había visto antes esos colores. (Desgraciadamente este libro no tiene ilustraciones en color, así que usted no puede ver cómo eran esos colores.) Su fantástico aspecto se completaba con una careta, que mostraba una permanente sonrisa increíblemente amplia.

Este personaje se dirigió a Alicia.

—*Bon soir, mademoiselle. Guten Abend, Fraulein. Good evening, young lady*. Buenas tardes, señorita. *Willkommen. Bienvenue. Welcome*. Bienvenida a la MAScarada.

—Gracias —contestó Alicia—. Pero ¿quién es usted y qué es una MAScarada?

—Soy el Maestro de Ceremonias de esta MAScarada —contestó el personaje—, que es el baile de máscaras de las partículas. Una noche de jolgorio y revelación. Una exploración del misterio detrás de la máscara. Todas las partículas vienen aquí a dar vueltas en alegre danza y, en ocasiones apropiadas, se quitan la máscara. Tu máscara, si me permites decirlo, es particularmente inspirada —añadió.

—No llevo ninguna máscara —dijo fríamente Alicia.

—Ah, ¿acaso puedes estar segura de eso? Todos llevamos máscaras de algún tipo. Bueno, esta noche ya hemos tenido dos desenmascaramientos.

—No veo cómo puede ser eso —dijo desafiante Alicia—. Uno puede desenmascararse sólo una vez. O se lleva máscara o no se lleva, eso es seguro.

—Bueno, eso depende de cuántas máscaras se lleven. Las partículas pueden llevar muchas máscaras. Al principio de la velada tuvimos un grupo de átomos, y después éstos se quitaron la máscara para revelarse como un grupo de electrones y una cantidad de núcleos. Más tarde tuvimos otro desenmascaramiento, y los núcleos se quitaron el disfraz para mostrar que eran realmente protones y neutrones con unos cuantos piones entre ellos. Te anticipo confidencialmente que habrá más revelaciones antes de que acabe la noche.



»Pero ahora —gritó lo bastante fuerte para que se le oyera en toda la sala—, ¡adelante con los festejos! *Mesdames et Messieurs, Damen*

und Herren, Ladies and Gentlemen, Señoras y Señores, les ruego salgan a bailar animadamente un "baile-colisionador".

Se produjo una serie de bruscos movimientos y Alicia observó que las partículas congregadas empezaban a circular alrededor de la sala. No podía decir que estuvieran bailando, pero desde luego daban vueltas con velocidad creciente. El problema principal era que no parecía haber un acuerdo general en el *sentido* en el que tenían que circular, así que unas daban vueltas en un sentido y otras en el contrario.

Cada vez más rápidamente los grupos circulantes de partículas se precipitaban unos contra otros. Enseguida sucedió lo inevitable y dos partículas chocaron dándose un tremendo golpe. Alicia miró hacia ellas preocupada por si habían resultado heridas en la colisión. No pudo determinar si habían resultado heridas, pero ciertamente no eran las mismas después de chocar. Vio varios pequeños piones, que no creía que estuvieran allí antes, alejarse del lugar de la colisión, y las mismas partículas que habían colisionado se habían transformado en algo completamente nuevo. Eran mayores y de alguna manera más exóticas de lo que habían sido; decididamente, no eran las mismas.

El baile continuó y se produjeron más choques, cada vez más con el paso del tiempo. En cada uno de ellos, partículas nucleares relativamente familiares se tornaron en algo nuevo y extraño. Enseguida hubo presente una asombrosa variedad de partículas; muchos más tipos de los que Alicia había visto antes o de los que había imaginado que existieran.

—Un espectáculo maravilloso, ¿no? —dijo una voz junto al oído de Alicia. Era el Maestro de Ceremonias, con su sarcástica máscara tan cerca que podía tocarse—. ¡Qué espléndido conjunto hadrónico de juerguistas «particulados»! ¡Qué esplendor de variedad bariónica! ¡Vaya, creo que no hay dos iguales!

Alicia no entendió muchas de las palabras que él había usado y pensó que era más prudente no preguntar acerca de ellas. Deseaba saber, lo más sencillamente posible, qué había sucedido.

—¿De dónde proceden todas esas nuevas partículas? —preguntó.

—Han sido creadas en las colisiones, por supuesto. Como has visto, todas las partículas circulaban muy rápidamente, de modo que tenían mucha energía cinética. Cuando colisionaban, esta energía cinética podía convertirse en energía (masa) en reposo, de manera que podían crearse partículas de mayor masa. En las diversas colisiones que tuvieron lugar se produjeron diferentes partículas. Cada una de ellas tiene su propia masa en reposo, lo que resulta muy conveniente para identificarlas, aunque existen otras diferencias más sutiles. Espero que en este momento no haya aquí presentes dos partículas de interacción fuerte que tengan la misma masa. Esto es lo que sucede en una MAScarada.

Una vez más elevó la voz para dirigirse a toda la sala:

> Las partículas pueden crearse en procesos de colisión; las energías cinéticas de las partículas que colisionan sirven para producir la energía de la masa en reposo de las nuevas

partículas. Muchas de esas partículas fueron descubiertas y clasificadas en diversos *grupos de simetría*, pero ahora se sabe que son diferentes combinaciones de quarks, de la misma manera como los átomos son combinaciones de electrones con protones y neutrones de su núcleo. Los fermiones, o *bariones*, contienen tres quarks, mientras que los bosones, o *mesones*, contienen un quark y un antiquark.

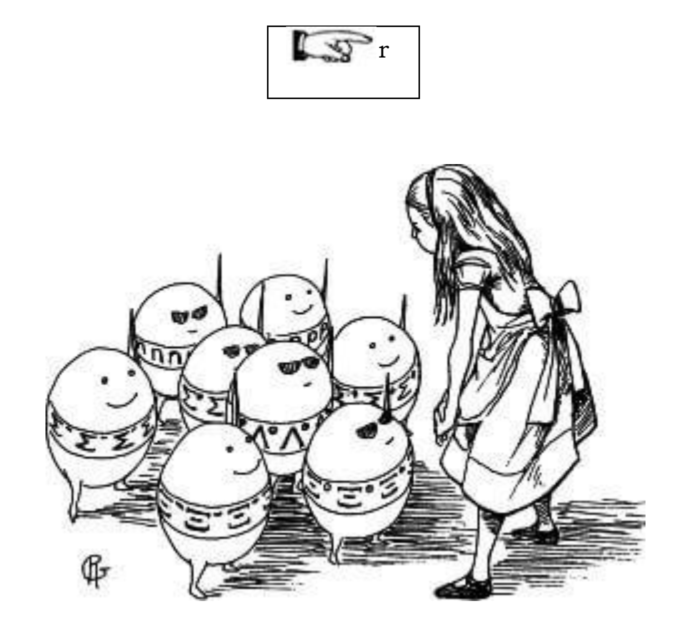
—El baile ha acabado. Por favor, reúnanse en sus multipletes apropiados.

Tras esta requisitoria, las partículas congregadas comenzaron a agruparse en pequeños conjuntos separados, distribuidos por la sala. Alicia observó que la mayoría se reunían en grupos de ocho partículas, seis de ellas colocadas en forma de hexágono exterior y otras dos juntas en el centro. Unos cuantos grupos contenían diez partículas en una disposición triangular que tenía cuatro de sus partículas distribuidas en su base.

—Ahí ves las partículas reunidas en sus grupos de simetría —dijo tranquilamente el Maestro de Ceremonias a Alicia—. Estos grupos son conjuntos de partículas que tienen los mismos valores de una determinada propiedad, como el espín. Puedes ver que hay una notoria regularidad en las diversas agrupaciones. Esto indica una semejanza existente por debajo de la superficie, o mejor por debajo de la máscara. Reconocerás los miembros del grupo más cercano —añadió.

Alicia miró las ocho partículas cercanas y vio que las dos en la parte superior del hexágono eran un protón y un neutrón. Sin embargo, las otras le eran desconocidas.

—Ése es un grupo de bariones en el que todos tienen espín en el medio —le dijo. Eso no significaba nada para ella, pero por el momento estaba dispuesta a creerlo—. Creo que ya conoces al protón y al neutrón. En la siguiente fila está la partícula sigma, que puede manifestarse con carga eléctrica positiva o negativa y también sin carga eléctrica alguna. En consecuencia, aparece como tres partículas diferentes. En el centro de la figura se tiene la lambda, que es una sola partícula sin carga. Todas ellas son partículas extrañas —añadió.



—Todas ellas me parecen muy extrañas —concedió Alicia, a la vez que se disponía a verlas más de cerca.

—No, no. La *extrañeza* es una propiedad que poseen ciertas partículas y a la que se le ha dado ese *nombre*. Como la carga eléctrica, ¿sabes?, salvo que es totalmente diferente —añadió inútilmente—. Las dos partículas que quedan son ambas la cascada. Aparece en dos diferentes estados de carga, así que hay dos de ellas —explicó—. Es doblemente extraña, por supuesto.

—Por supuesto —repitió Alicia.

—Y ahora ha llegado nuestro momento —anunció de repente el Maestro de Ceremonias, hablando tan alto y claro que su voz se propagó por toda la sala—. Ahora es el momento del desenmascaramiento final de la noche. *Mesdames et Messieurs, Damen und Herren, Ladies and Gentlemen*, Señoras y Señores… ¡Máscaras fuera!

Alicia no pudo nunca saber del todo cómo se hizo, pero el aspecto de todas las partículas a su alrededor cambió. Miró a la partícula más cercana, que era la que el Maestro de Ceremonias había denominado la lambda. Ya no parecía una partícula, sino una especie de bolsa, en cuyo interior pudo ver tres formas. Se acercó para tratar de distinguirlas más claramente y se sintió atraída hacia dentro. Trató de tirar hacia fuera, pero a pesar de sus esfuerzos fue absorbida.

Una vez dentro, Alicia descubrió que allí no había sitio para estar de pie. Trató de arrodillarse en el suelo, pero el envase la seguía apretando tan estrechamente que intentó tumbarse con un codo encima del suelo y el otro brazo alrededor de la cabeza.

En esta difícil postura miró a su alrededor y se fijó en las tres pequeñas figuras que había divisado vagamente desde fuera. Ahora que podía verlas, advirtió que eran diferentes de cualquiera de las partículas que había encontrado hasta entonces. Cada una de ellas estaba coloreada con un matiz distintivo. Una era roja, otra verde y la otra azul. Notó que estaban unidas entre sí mediante trozos de una especie de cable multicolor. En él se veían franjas de esos tres colores, junto con los tres anticolores que había visto en el traje del Maestro de Ceremonias.

Alicia estaba tan absorta estudiando esas raras nuevas partículas que se sobresaltó al oír una voz que provenía de una de ellas.

—Si crees que somos imágenes cinematográficas —dijo—, debes pagar, ¿sabes? Las películas no se hacen para que se vean gratis. ¡Desde luego que no! Por el contrario —añadió—, si crees que estamos vivos, debes decir hola y estrecharnos la mano.

Los quarks son la forma más fundamental de materia conocida hasta la fecha. Todas las partículas que interactúan fuertemente (hadrones) son grupos ligados de quarks. Cada fermión se compone de tres quarks, y cada bosón, de un quark y un antiquark unidos entre sí. El enlace es muy fuerte y, como la interacción eléctrica, se debe al intercambio de partículas virtuales.

—Lo siento —dijo Alicia doloridamente, tendiendo, con cierta dificultad, su mano. No estaba segura de cómo sucedió, pero de alguna manera descubrió que, en lugar de una mano, estaba estrechando la larga pera de goma de un viejo claxon. Cuando la apretó sonó un bocinazo—. Bueno, ¿quiénes son ustedes, pues? —preguntó algo irritada por la bromita.

—No necesitamos presentación, así que yo la haré. Somos los Tres Hermanos Quarks —respondió el portavoz, moviendo sus espesas cejas al mirarla—. Yo soy Uppo, éste es Downo y el de allí Strangeo[12]. —Uppo era verde, Downo rojo y Strangeo azul.

—Espero que no les importe que me una a ustedes —dijo Alicia, tratando de aligerar su difícil posición.

—¿Por qué? Nosotros no vamos a separarnos —respondió Uppo, y los tres soltaron la carcajada.

Alicia no se divertía; no encontró la broma muy graciosa. De hecho, pensándolo mejor, no estaba segura de que tuviera gracia en absoluto. Miró irritada a los tres hermanos y se sorprendió al ver que ahora Uppo era rojo y Downo verde.

—Ha cambiado usted de color —dijo Alicia en un tono casi acusador.

—Naturalmente —replicó Uppo con calma—. No solemos tener un color único. Empecé siendo completamente verde, después me sentí algo azul, y ahora empiezo a ver en rojo. ¿Sabes que las partículas

[12] Los nombres de los Tres Hermanos Quarks (en clara referencia a los geniales Hermanos Marx) proceden de los correspondientes de los tres quarks en inglés: *up* («arriba»), *down* («abajo») y *strange*(«extraño»); me parece evidente que cualquier traducción sería inadecuada y superflua. (*N. del T.*)

poseedoras de carga eléctrica intercambian fotones? —dijo bruscamente.

—Sí, eso me dijeron —replicó Alicia.

—Pues bien, nosotros los quarks somos personajes llenos de colorido. Nos mantenemos unidos por el intercambio de gluones. Por las buenas o por las malas, o más bien por el rojo, el verde y el azul. Los gluones esperan por ahí, a nuestro alrededor, cuando ven el color de nuestro dinero; vigilan nuestro color. Todas las partículas que tienen color intercambian gluones; éstos las mantienen unidas de manera muy parecida a como lo hacen los fotones con las partículas cargadas.

—¿Pero por qué cambian ustedes de color? Las partículas cargadas no cambian su carga eléctrica cuando intercambian fotones.

—No, pero los fotones no transportan carga. No existe ninguna carga sobre un fotón, lo cual es la razón de que sean tan populares. Los gluones sí transportan color. Cuando un gluón coloreado escapa de su fuente, ese color se transfiere al quark que lo atrapa. Es alguien normal aquel que tiene color, puedo asegurártelo.

Mientras Uppo estaba hablando, Downo cambió su color a azul y Strangeo se convirtió en rojo, adquiriendo su pelo rizado un matiz particularmente vívido. Uppo señaló a Strangeo.



—¡Allí! —dijo—, ¡ése es una fuente de un color diferente!

—Es debido a que tenemos esos gluones coloreados, por lo que no podemos separarnos nunca. Uno para todos y todos para nada. Unidos resistimos, y divididos permanecemos inseparables.

—Me temo que no entiendo en absoluto lo que quiere decir —protestó Alicia.

—Veamos. Todos sabemos que cargas eléctricas opuestas se atraen, pero las partículas que sufren esa clase de atracción pueden separarse. Se mantienen unidas por el intercambio de fotones, pero los fotones no tienen carga.

—Si no existe ninguna carga sobre los fotones, entonces son libres. Van a donde quieren —dijo Downo de repente.

—Cierto. Como los fotones no tienen carga, son libres, libres de esparcirse cuanto deseen. No se intercambian otros fotones entre ellos.

—Si no hay ni cambio ni carga, no hay ninguna transacción —añadió Downo—. Esos fotones no hacen ningún negocio juntos.

—Sin carga los fotones virtuales no tienen negocio alguno entre ellos, así que no se atraen uno a otro. Nadie puede obtener de ellos carga alguna. Así pues, se esparcen por todo el lugar. Cuanto más se aleja la fuente, más sitio tienen los fotones para extenderse. Los fotones se esparcen tenuemente. Tienen un tiempo muy monótono, con menos momento que transferir.

Muchas partículas tienen carga eléctrica, y es un hecho llamativo que las partículas observadas tienen cargas que

son todas del mismo tamaño. Algunas partículas tienen carga positiva y otras, negativa, pero la *cantidad* es la misma en todos los casos. Esta cantidad se denomina usualmente la *carga del electrón*, simplemente porque los electrones fueron las primeras partículas que se descubrieron. Las estimaciones de las cargas poseídas por los quarks requieren que éstos sean diferentes. Un quark puede tener carga positiva, que es *dos tercios* del tamaño de la carga del electrón, o puede tener carga negativa, que es un tercio de la que tiene un electrón. Como los quarks no pueden escapar de sus grupos ligados, estas cargas fraccionarias no pueden observarse directamente, pero existe una fuerte evidencia de que son correctas.

—En mi último trabajo, conseguí una transferencia —cortó Downo servicialmente—. Ellos dijeron que iban a darme un pequeño momento, pero todo lo que me dieron fue una patada.

—Y tú sentiste la fuerza de su argumento —replicó Uppo—. Pero con menos momento para dar, la fuerza se hace más débil. Separas mucho las cargas, éstas pierden el contacto, la atracción se va haciendo más débil, y con el tiempo pierden tanto el contacto que incluso olvidan escribirse. Dales suficiente energía y puedes llevarlas adonde quieras. Pueden separarse tanto que ya no queda ninguna atracción de la que pueda hablarse. Pero ya está bien de cargas eléctricas, estamos aquí para hablar de las cargas de quark.

—¿Qué es una carga de quark? —preguntó Alicia con curiosidad, siempre ansiosa de ver las cosas tan claras como pudiera.

—Doble ración los fines de semana y para los quarks *up* —respondió Downo—. Pero somos muy baratos. Nuestra carga es sólo un tercio de la carga de otras partículas.

—Hay una cosa que no entiendo —dijo Alicia a Downo. (Eso era una subestimación, pues había muchas cosas que Alicia no entendía por el momento.)—. ¿Por qué intenta hablar como si fuera italiano? No creo que lo sea[13].

—Es porque es un fermión —replicó Uppo en su lugar—. Enrico Fermi era italiano.

—¿Pero no son todos ustedes fermiones? —protestó Alicia.

—Ciertamente. Uno para todos y todos para Pauli. Y nadie lo puede negar —los tres quarks se pusieron en posición de firmes y saludaron.

»Somos un grupo indivisible. Un quark no puede escapar del interior de un protón o de cualquier otra partícula. Eso es debido al rojo, verde y azul. Hay vieja gloria para ti.

—Perdón —empezó a decir Alicia.

—*Gesundheit!*[14] —respondió Uppo, pero Alicia prosiguió con determinación.

—No sé qué quiere decir con *gloria*.

---

[13] Efectivamente, en el original las expresiones de Downo intentan remedar la pronunciación del inglés que (supuestamente) tendría un italiano. No se ha intentado hacer lo mismo en la traducción porque perdería la supuesta gracia. (*N. del T.*)

[14] «¡Salud!» En alemán en el original. (*N. del T.*)

—Por supuesto que no lo sabes. Hasta que yo te lo diga. Quería decir «Hay un espléndido argumento demoledor para ti».

La existencia de tres tipos diferentes de quarks permite a los gluones tener también color. Cada glún es una mezcla de color y anticolor. Con los fotones una mezcla de carga y anticarga da una partícula sin carga, pero los gluones pueden mezclar diversos colores. Un glún puede ser azul y antiverde, por ejemplo, y entonces no es neutro; posee color y puede actuar como fuente de otros gluones. Esto significa que los gluones están también ligados entre sí y forman estrechas cuerdas que mantienen los quarks unidos, y no se esparcen ampliamente como hacen los fotones.

—¡Pero *gloria* no significa eso! —protestó Alicia.

—Cuando uso una palabra, yo elijo su significado, ni más ni menos. La cuestión es cuál ha de ser el amo, eso es todo. Pero hay otra cuestión con los gluones —añadió con pesimismo—. No hay manera de dominarlos, nunca ceden, al contrario que los fotones. La dificultad es que todos los gluones son coloreados. Y el color crea gluones, como la carga crea fotones, así que todos los gluones emiten otros gluones y éstos emiten más gluones. Se empieza con sólo uno o dos y se acaba con cientos. Es como tener en casa a la familia de la esposa. Y como todos son gluones de intercambio, todos permanecen unidos, justo como la familia de la esposa. En vez

de esparcirse en una amplia nube difusa como los fotones, se agrupan para formar las firmes cuerdas coloreadas de gluones virtuales que ves aquí. Como están apelotonados, no tienen la posibilidad de esparcirse como los fotones. Aquí no existe algo como un pelotón libre.

»Cuando un quark se aleja, enseguida llega al final de sus fuerzas. Si tenemos más energía, los gluones nos darán más cuerda, pero continuamos colgados de un extremo. La atracción gluónica nos devuelve a casa, sin importar lo lejos que vaguemos. No podemos alcanzar la libertad, pero todavía podemos escapar con una pequeña ayuda de nuestros amigos.

En ese particularmente apropiado momento, un fotón muy energético se estampó contra el pequeño grupo de quarks. A Alicia la pilló de improviso, pues no lo había visto llegar. De hecho, como advertía ahora, los fotones se movían tan rápidamente que nunca había visto venir a alguno antes de que hubiera llegado. El fotón colisionó con Strangeo, excitándolo a un frenesí maníaco, y éste salió disparado dando bocinazos. Tras él, la cuerda que lo ataba se estiró más y más. Alicia pudo observar que, independientemente de cuánto se estirase, la cuerda no se hacía más delgada ni más débil. Era evidente que podía seguir estirándose de manera indefinida y que el quark fugitivo pronto agotaría su energía sin ninguna oportunidad de liberarse. Pero justo cuando Alicia había llegado a esa conclusión la cuerda se rompió.



Donde un momento antes había habido una larga y firme cuerda que engullía toda la energía que había soltado el fotón, había ahora *dos* trozos muy cortos con una abertura grande que crecía constantemente. En cada lado de esta abertura había aparecido un nuevo quark, y cada uno de ellos sujetaba uno de los extremos rotos de las cuerdas. En el extremo de la cuerda que aún ligaba los dos quarks que habían permanecido con Alicia había otro quark que se parecía exactamente a Downo, excepto que era de distinto color. Strangeo, que se alejaba rápidamente, sujetaba su propio trozo corto de cuerda, a la que iba unida una versión invertida de Downo. Alicia supuso correctamente que éste era un antiquark.

—¿Qué ha sucedido? —preguntó Alicia confundida.

—Acabas de ver una fuga de quarks a lugares bajos con la ayuda de amigos. Al vacío, de hecho, y no puede irse más abajo. Uno no puede desprenderse de una cuerda de gluón una vez que éste ha visto el color de un quark, así que tenemos que engañarlo con algo que parezca exactamente un quark.

—¿Y qué es eso? —preguntó Alicia.

—Otro quark, por supuesto. Cuando la cuerda gluónica se ha estirado tanto que contiene suficiente energía para las masas en reposo de dos quarks, entonces cortamos la cuerda y hacemos el cambio. Un extremo adquiere un nuevo quark, el otro no.

—¿Hay un nudo en la cuerda?[15] —preguntó Downo (uno de los Downos).

—Así es, hay un quark en un extremo y un no-quark en el otro.

—¿Qué es un no-quark? —preguntó Alicia.

—Un antiquark. Y si te crees eso, deberías visitar a mi prestamista. Una parte de la cuerda original ha desaparecido rápidamente a lo lejos, llevándose la energía y conectando al ausente Strangeo con el nuevo antiquark. Así, ya ves, la ausencia hace la separación más lejana.

—Puede que él haya escapado, pero todavía no es libre —protestó Alicia.

—Con una ligadura era libre. Ahora se ha librado de nosotros, pero está aún ligado. Está ligado con su antiquark en un bosón. Eso es como un pión, pero los piones pueden ser engañosos y en este caso, en lugar de ello han formado un kaón. No se puede ver un quark libre; ni siquiera liberar un mar de quarks[16], pero ésa es «otra olla de pescado».

—¿Hay pescado en el mar de quarks? —preguntó Downo.

---

[15] «No», en inglés *not*; «nudo», en inglés *knot* (pronunciado «not»); de ahí el juego de palabras. (*N. del T.*)

[16] Otro juego de palabras, que no lo es en español, entre «ver un quark libre» (*see a free Quark*) y «liberar un mar de quarks» (*free a Quark sea*); nótese que *see* y *sea* se pronuncian igual. (*N. del T.*)

—No, no, el mar de Quarks no tiene nada que ver con el pescado. Su único propósito es contener los pares virtuales quark-antiquark.

—Entiendo lo del lenguado y lo de la marsopa, pero ¿por qué peras en el mar?[17] —arguyo Downo.

—Olvida el mar —replicó Uppo—, o nos marearemos todos. El asunto es que nunca se encontrará un quark solo, aislado.



—¿Significa eso que han de permanecer aquí para siempre sin ninguna oportunidad de cambio? —preguntó Alicia con interés.

—Bueno, siempre podemos tener alguna. Se dice que un cambio es tan bueno como un reposo, pero me siento en libertad de discutir la interacción débil.

—Oí mencionarla cuando visité el núcleo. Creo que tiene algo que ver con la desintegración beta de los núcleos, sea ello lo que fuere.

—Es lo mismo. Lo que ocurre es que un neutrón del interior del núcleo se transforma en un protón y un electrón, junto con otra partícula llamada neutrino. Este neutrino no tiene carga ni masa[18], y no sufre la interacción fuerte. No es que haga mucho realmente, como la mayor parte de la gente que conozco. En cualquier caso, ésa es la historia que contamos. Lo que *realmente* sucede es que un

[17] Siguen los juegos de palabras en inglés. *Sole*: «único» y «lenguado» *purpose*, *porpoise*, que se pronuncian casi igual: «propósito», «marsopa»; *pairs, pears*, también de igual pronunciación: «pares», «peras». (*N. del T.*)

[18] En la actualidad hay convincente evidencia de que los diferentes (hay de tres clases) neutrinos tienen masa. Los valores de las correspondientes masas no se conocen exactamente, pero se sabe que éstas son muy pequeñas comparadas con las de las otras partículas elementales. (*N. del T.*)

quark *d (down)* de dentro del neutrón se transforma en un quark *u (up)*, un electrón y un neutrino. Cuando el quark *d* se transforma en un quark *u*, todo sube (*up* = arriba). Se aumenta la carga, el neutrón se convierte en un protón, y ya está. Quédate por aquí y quizás tengas suerte.

Apenas había acabado de hablar cuando, debido a una coincidencia de lo más conveniente, uno de los dos Downos se hizo borroso y empezó a cambiar y a perder su identidad. Tras un breve momento de transición, Downo ya no estaba allí y su lugar lo ocupaba un doble de Uppo. Al moverse éste hacia un lado, Alicia vio un electrón escaparse del mismo lugar. A éste le seguía otra partícula más. Alicia captó sólo una brevísima impresión de esta última, algo apenas percibido y muy difícil de ver. Supuso que era el neutrino, desempeñando su papel habitual de ignorar todo y ser ignorado por todos.

El grupo de tres quarks consistía ahora en un Downo y dos Uppos idénticos. Idénticos, salvo por el hecho de que uno seguía siendo verde y el otro azul.

—¡Jo! —dijo Alicia—. Esto ha sido algo absolutamente impresionante.

Obedientemente, los dos Uppos replicaron al unísono:

—Esto ha sido algo absolutamente impresionante. ¿Pero qué puede esperarse —añadieron— cuando las partículas intercambiadas en una interacción tienen carga eléctrica? Los fotones no tienen carga, pero esto no es la carga de la brigada ligera[19]. Cuando una fuente

[19] Nuevo juego de palabras: *light* = «luz» o «ligero». (*N. del T.*)

emite una de estas partículas cargadas, debe compartir la carga. Allí no se permiten fluctuaciones, ¿sabes? Cuando la carga de una partícula ha cambiado, se cuenta como una nueva partícula. Debes de haber oído hablar de las cuentas de crédito[20]. Así es cómo los quarks consiguen cambiar —concluyeron.

—¿Pero de dónde procede el electrón? —preguntó Alicia, que tenía la impresión de que la explicación era algo incompleta.

—Las partículas intercambiadas en la interacción débil se llaman W —empezó a decir Uppo bastante inconsecuentemente.

—¿Qué? —respondió Alicia, olvidando por el momento sus buenas maneras.

—No «¿qué?», sólo W[21]. No se parece mucho a un nombre, pero es todo lo que tienen, pobrecitos. Hay dos, ¿sabes?: uno es W más (W^+) y el otro W menos (W^-). Nadie les ha preguntado nunca qué representa la W —acabó pensativamente—. De cualquier modo —continuó—, estos Ws, como los llaman sus amigos, son tipos muy amistosos. Se mezclan con cualquiera. Interactúan con leptones y con hadrones; con electrones y con partículas de interacción fuerte. Así, pues, cuando un quark *d* decide que es el momento de transformarse en un quark *u*, aumenta su carga. La carga eléctrica del quark ha aumentado, de modo que éste emite una partícula W^- para cuadrar el balance. Este W a su vez interactúa con un neutrino de paso, el cual no tiene carga alguna, y lo convierte en un electrón, que sí tiene carga eléctrica. El electrón se encuentra en compañía de

[20] Literalmente «cuentas de carga», de ahí el juego de palabras. (*N. del T.*)

[21] ¿Qué? es *What?* en inglés, de ahí el juego de palabras. (*N. del T.*)

un montón de partículas con interacción fuerte, lugar en donde no tiene derecho a estar, y se va tan rápidamente como puede.



—¿Pero dónde encuentra el W un neutrino al que pueda transformar en un electrón? —preguntó Alicia algo perpleja—. No creía que hubiera ningún neutrino antes. Pensaba que era emitido después de la desintegración, junto con el electrón.

—¡Ajá!, ahí es donde él te engaña. Tú creías que él debería existir *antes*, pero por el contrario existía *después*. Esperabas que llegara del pasado, pero viene a hurtadillas desde el futuro, y no obstante llega cuando se lo necesita. Por supuesto, como viene del futuro, todavía está rondando por aquí después, en trance de llegar. De esta manera consigue ser a la vez el neutrino convertido por el W y el emitido tras la desintegración. Eso reduce los gastos.

—¿Pero cómo puede venir del futuro? —preguntó Alicia. Cuando hablaba tenía la clara impresión de que ya sabía la respuesta a esa pregunta.

—Es un antineutrino, desde luego. Uno de mis «antis» favoritos. Toda partícula tiene su antipartícula, que es su opuesta en todo y viaja hacia atrás en el tiempo. Éste es el gran lema de las antipartículas: «Sea lo que sea, estoy en contra».

—¿Y no hay manera alguna de que ustedes puedan ser libres? —preguntó Alicia, para estar completamente segura de esto.

—No, ninguna en absoluto —le contestaron.

—¿Significa eso que yo tampoco puedo escapar? —preguntó Alicia abatida, porque realmente no deseaba estar atrapada con ellos para siempre.

—En absoluto. Tú no tienes color, así que los gluones no te retienen. Tú eres una de las personas menos coloreadas que jamás hemos visto, de modo que no hay nada que te retenga; puedes marcharte cuando quieras. Ni siquiera lo notaremos. Puedes levantarte y salir pitando. Pero no olvides la propina.

Eso parecía demasiado sencillo, pero en cualquier caso Alicia lo intentó. Se levantó y descubrió que no había nada que le impidiera abandonar el grupo en cualquier momento. Se desperezó tras su encierro en un lugar tan pequeño, miró a su alrededor y descubrió que tenía enfrente la máscara burlona del Maestro de Ceremonias, la cual estaba a menos de un metro del rostro de Alicia. Lo miró fijamente, hipnotizada por su amplia y permanente sonrisa y las negras cuencas de los ojos encima. En las oscuras profundidades donde tendrían que haber estado sus ojos creyó que podía ver una intensa chispa azul, como una estrella lejana en una clara y helada noche.

—¿Cómo lo pasaste en tu encuentro con los quarks? —le preguntó alegremente a Alicia.

—Fue muy interesante —replicó ésta sinceramente—. Eran personajes llenos de colorido, pero los encontré bastante volubles. ¿Era ése el último desenmascaramiento de esta noche —continuó Alicia— o existen más capas que hay que desnudar antes de que pueda ver lo que realmente existe?

—¿Quién puede decirlo? —le respondió—. ¿Cómo puedes saber si estás contemplando la cara desnuda de la naturaleza o si simplemente estás mirando otra máscara? No obstante, esta noche hay sólo otro desenmascaramiento pendiente. Aún tengo que despojarme de mi máscara.



Al tiempo que hablaba, el brillante foco luminoso que lo había seguido durante toda la noche empezó a apagarse, y la luz de las arañas de encima se hizo aún más débil. A la vez que la luz se apagaba, el Maestro de Ceremonias se llevó las manos a la cara y se quitó lentamente la máscara.

En la luz que se apagaba rápidamente Alicia miró el rostro tras la máscara. No pudo ver nada salvo un óvalo liso, un vacío total sin características de ninguna clase. Miró sorprendida ese enigmático rostro y, cuando se apagaba el último destello luminoso, vio que la *máscara* le hacía un guiño.

Capítulo 10

El Parque de Atracciones de la Física Experimental

La oscuridad alrededor de Alicia aclaraba lentamente. Las sombras se apartaban de sus ojos, que quedaron deslumbrados por un caos de brillantes luces y colores, al tiempo que una agresiva cacofonía de sonidos asaltaba sus oídos. Miró a su alrededor y descubrió que se hallaba en medio de una variada y alegre multitud. Parecía haber toda clase de personas, con todo tipo de vestimentas. Algunas llevaban batas blancas, como las que uno se imagina llevan los científicos en sus laboratorios, mientras otras vestían informalmente o muy bien trajeadas. Vio vestimentas de todos los países del mundo, y de muchas épocas diferentes del pasado.

Había hombres con impresionantes patillas que vestían levitas victorianas, y otros que llevaban chilabas, o la vestimenta china tradicional, con anchas mangas y largas coletas. Vio un individuo particularmente peludo que caminaba tambaleándose, vestido de pieles crudas de animales, y que acarreaba algo que parecía una tosca rueda de piedra. Las palabras PATENTE SOLICITADA estaban cuidadosamente cinceladas en una parte de la rueda. Un hombre en particular atrajo su atención por alguna razón; parecía tener alguna cualidad especial, pero no era capaz de discernir qué podría ser. Tenía una cara pálida y expresiva y vestía los calzones, chaleco y ancha levita del siglo XVII. Caminaba absorto en sus pensamientos dando grandes bocados a una deslumbrante manzana roja.



—¿Dónde estoy? —se preguntó, hablando en alta voz pero sin esperar ser oído en la barahúnda levantada a su alrededor.

—Estás en el Parque de Atracciones de la Física Experimental —fue la inesperada respuesta.

Alicia miró para ver quién había hablado. Y descubrió que, una vez más, estaba acompañada por el Mecánico Cuántico, que caminaba tranquilamente a su lado. Éste señaló una pancarta extendida a lo largo de una puerta por la que parecía que habían entrado. En ella se leía:

PARKE DE ATRACCIONES DE
LA PHISICA EXPERIMENTAL

—La ortografía parece bastante extraña —comentó Alicia. Esto fue lo primero que le llamó la atención.

—Bueno, ¿qué esperabas? Aquí todos son científicos, ¿sabes? Éste es el gran carnaval de la observación empírica. Aquí encontrarás muchas demostraciones de fenómenos físicos y casetas de resultados experimentales.

Alicia miró con atención a su alrededor y vio una variedad espléndida de casetas y puestos, y aquí y allá edificios más compactos. Todos exhibían grandes carteles brillantemente coloreados que se disputaban la atención de la muchedumbre. Alicia leyó algunos de ellos:

Diviértete con la emoción de la colisión de partículas

Caza el neutrino

Pon fuera de combate a un quark y gana un Premio Nobel

Hubo cierto lío en la muchedumbre cercana. Alicia miró hacia allí y vio a un hombre calvo y con barba envuelto en lo que parecía ser

una gran toalla de baño. Se abría camino empujando a la multitud, dificultado por el hecho de llevar un gran tablón de anuncios en una mano y una increíblemente larga pértiga o algún tipo de palanca en la otra. Miró con atención el anuncio que llevaba ese hombre. En la parte superior, pintadas con tosquedad, pudo distinguir, prácticamente borradas, las palabras:

¡Sienta moverse la Tierra!

Debajo leyó el siguiente mensaje:

¡Véame mover el mundo!

—¿Quién es? —preguntó Alicia—. ¿Y qué es lo que intenta?

—Es un filósofo griego muy conocido. Evidentemente trata de poner en práctica su vieja manía de mover el mundo.

—¿De veras? —exclamo Alicia—, ¿mueve entonces el mundo frecuentemente?

—¡Oh, no, nunca! No puede nunca encontrar un sitio fijo como punto de apoyo de su palanca, ¿entiendes?

Como eso no tenía pinta de ser muy divertido, Alicia miró a su alrededor para encontrar algo más prometedor. Atrajo su atención un puesto cercano que mostraba el nombre «Cañón botoeléctrico».

Era una especie de arma estilizada con la que el jugador podía dirigir un haz de luz a una superficie metálica.



La luz causaba la emisión de electrones en el punto de la pantalla donde impactaba, y la idea, como explicó el dueño del puesto, era hacer que los electrones recorrieran una pequeña distancia hasta una especie de cubo, donde se recogían. Esto le pareció a Alicia bastante fácil, aunque le explicaron que, para hacerlo algo más interesante, había un campo eléctrico débil que se oponía al paso de los electrones y los hacía retroceder antes de que llegaran al colector. Después de todo, como explicó el dueño del puesto, había un mecanismo de control que permitía que Alicia aumentara en muchas veces la intensidad presente del haz luminoso.

No obstante, descubrió que por mucho que lo intentara *no lograba* que ningún electrón recorriera esa pequeña distancia. Elevó la intensidad de la luz más y más. Se emitieron más y más electrones,

pero el campo eléctrico hizo que todos retrocedieran en el último minuto.

La descripción cuántica del mundo difícilmente es la que habríamos esperado. La razón para creer en ella es que sus predicciones se muestran de acuerdo con los resultados experimentales. Es la única teoría que proporciona alguna clase de explicación del comportamiento de la materia en la escala atómica, y lo hace notablemente bien.

—¡Esto va fatal! —exclamó Alicia frustrada.

—Me temo que es lo que era de esperar —replicó su acompañante tristemente—. ¿Te das cuenta? Te han proporcionado sólo el control de la *intensidad* de la luz y no de su *color* (o frecuencia). Si la luz fuera una onda clásica, se esperaría que al aumentar su intensidad la perturbación asociada aumentara y ello comunicaría más energía a los electrones que emitía la superficie del metal. De hecho, es el color, o frecuencia, de la luz lo que decide la energía de los fotones individuales que la componen. Como no te han facilitado ninguna manera de alterarla, no puedes cambiar la energía de los fotones o, lo que es lo mismo, la de los electrones que ellos expulsan de la superficie del metal. El puesto ha sido, por supuesto, montado cuidadosamente para que dicha energía no sea *suficiente* para atravesar el campo eléctrico retardador. Cuando aumentabas la intensidad de la luz, dirigías más fotones hacia la superficie, y éstos

producían más electrones, pero todos ellos tenían la misma energía; en todo caso, ésta no era suficiente para que el electrón llegara al colector. Me temo que no puedes ganar.

Alicia se sintió algo engañada por la experiencia en ese puesto y miró alrededor buscando algo diferente para pasar el rato. Cerca había una pequeña caseta con un anuncio que decía:

¡PASEN Y VEAN!

Contemplen la mayor colección

de quarks en cautividad

Las características fundamentales del comportamiento cuántico son la detección de partículas discretas y la observación de interferencia. La observación de los cuantos se manifiesta en el efecto fotoeléctrico: la producción de electrones mediante luz que incide sobre una superficie metálica. El único resultado de aumentar la intensidad de la luz es incrementar el número de fotones presentes y por consiguiente el número de electrones. Cada fotón no obstante interactúa por sí mismo, de modo que si no se cambia la *frecuencia* de la luz al alterar su *intensidad*, cada fotón seguirá teniendo la misma energía y las energías de los electrones producidos será la misma, sea cual sea la

intensidad de la luz. Esto es completamente diferente del comportamiento esperado de una onda clásica, en donde una mayor intensidad significaría más energía impartida a los electrones.

Alicia y su acompañante entraron en la caseta, en donde el expositor le estaba diciendo a una pequeña multitud lo afortunada que era al poder ver los seis quarks al completo capturados y exhibidos para su entretenimiento. Alicia los miró. Ninguno de los quarks se presentaba individualmente, por supuesto. Todos estaban emparejados, cada uno ligado indisolublemente a su antiquark. Alicia se dio cuenta de que esto era lo más parecido posible a un conjunto de quarks aislados. «Y después de todo —pensó—, él dijo que estaban en cautividad.»

Alicia contempló los pares de quarks congregados. Estaban reunidos en una especie de tribuna de varios niveles, con las combinaciones de quarks más pesados situados en un nivel más alto de energía. Vio un quark *u* que movía sus espesas pestañas hacia ella, un quark *d* y, un poco más arriba, un quark *s* con una flameante cabellera rizada.

Además de esos tres tipos, que ya había conocido en la MAScarada, había otros dos en lugares aún más altos. Uno de ellos proyectaba una personalidad cautivadora, y Alicia vio un destello luminoso, como un anuncio de dientes increíblemente blancos.

—Ése es el quark *c* (*charm* = «encanto») —murmuró el Mecánico Cuántico a su oído.

El otro quark nuevo era aún más pesado. Estaba colocado en un sitio muy alto y Alicia lo vio menos claramente que otras partículas que había conocido, pero tuvo la extraña impresión de que tenía cabeza de asno.

—Ése es un quark *b* (*bottom* = «fondo») —le informó su acompañante.

Alicia ahora miró más arriba para ver el sexto quark. Su posición estaba marcada en la tribuna, pero estaba vacía. No había señal alguna del sexto quark, el cual, se le informó, sería el quark *t* (*top* =«cima»).

Otros componentes del público también habían notado la ausencia del sexto quark y protestaban ruidosamente.

—¡Está bien, está bien! —dijo el exhibidor pidiendo calma—. Sé que está en algún sitio por aquí. El quark *t* es el más pesado de todos, así que hemos de buscarlo en altas energías, pero tiene que estar allí.

Cogió una gran red para cazar mariposas colgada de una vara larga, subió por una escalera de mano y empezó a agitar la red al azar justo por debajo del techo de la caseta.

Entre tanto, el público se mostraba más intranquilo por momentos y se oían frases poco corteses en todo el recinto. El ambiente empeoró por momentos y la gente empezó a salir de allí con el propósito de escribir cartas críticas a sus revistas técnicas favoritas.



—¡Vámonos! —le dijo el Mecánico Cuántico a Alicia—. Éste no es ahora un lugar para nosotros.

Hace algunos años se confirmó la existencia del quark t («cima») con una masa muy elevada. Este quark se une a los dos ya conocidos antes, *c* (*charm* = «encanto») y *b*(*bottom* = «fondo»), para completar el cuadro. En la actualidad se cree que hay seis y sólo seis tipos de quarks y un conjunto de igual número de leptones. ¿Están a su vez los quarks hechos de algo más fundamental? No hay, actualmente, manera alguna de decirlo.

Salieron fuera y lo que captó la atención de Alicia fue un puesto en donde había gente que lanzaba bolas sobre varios regalos que

obtendrían sólo si los derribaban fuera de la tarima. Se parecía mucho a los puestos de feria que había visto cerca de su casa, excepto que en éste había una especie de cerca de delgados alambres uniformemente espaciados entre los competidores y sus blancos.

Alicia estuvo un rato mirando y observó que en el instante en que se lanzaba la bola, ésta se hacía completamente borrosa y resultaba imposible saber adónde había ido a parar hasta que impactaba en algún punto de la pared trasera de la caseta.

Vio que la mayoría de las bolas hacían eso; daban contra la pared y no a alguno de los regalos. Poco a poco fueron formándose pilas de bolas en los lugares donde habían impactado, y Alicia pudo ver que estas pilas se situaban limpiamente en los espacios que había entre los regalos.

—Justo en su sitio —dijo alguien cerca, haciéndose eco de sus pensamientos—. Los alambres regularmente espaciados actúan de manera que producen un patrón de interferencia, con mucha mayor probabilidad de observar las bolas en ciertos lugares que en otros. Naturalmente, los mínimos, es decir, los lugares en donde es más baja la probabilidad de encontrar una bola, están situados justo donde están los premios.

—Eso no parece muy honrado —puntualizó Alicia.

—Bueno, no, quizás no, pero en el Parke de Atracciones no se espera que nadie sea honrado. Después de todo, el dueño del puesto tiene que ganarse la vida, así que no desea dar premios muy frecuentemente. Desde luego, aún hay alguna *probabilidad* de que

la bola se observe en los mínimos, de manera que en *algunas* ocasiones se consigue el premio, pero no en muchas.

Alicia tenía todavía la impresión de que de alguna manera eso no estaba bien, pero antes de añadir algo captó su atención un gran pabellón algo más lejano. Estaba coronado por un enorme anuncio brillante que decía:

EL GRAN PARADOX

Acción fantasmal a distancia

Debajo del anuncio había una porción de grandes carteles pegados a lo largo de la parte delantera del edificio.

¡Extraordinariamente pasmoso!

¡Paradójicamente incomprensible!

¡Realmente sorprendente en su totalidad!

Alicia y su acompañante anduvieron hasta allí y se unieron a la multitud que penetraba a través de la puerta de entrada. Dentro había un largo recinto de techo elevado con una tribuna levantada en el centro. En cada uno de sus lados había un par de cortas rampas que conducían hasta unas puertas en los extremos del

edificio. En cada rampa descansaba un corto cilindro de metal acabado en punta y con rechonchas aletas en su parte posterior.

En la tribuna central permanecía el «Gran Paradox», un tipo alto con brillante pelo oscuro, tieso bigote encerado y una ondulante capa.

—Buenas tardes, señoras y caballeros —saludó—. Hoy tengo la intención de realizar un pequeño experimento de reducción de amplitudes, que tal vez encuentren interesante.

Las características fundamentales del comportamiento cuántico son la detección de partículas discretas y la observación de interferencia. Las partículas, o cuantos, se observan en un lugar determinado, y no dispersadas en una zona amplia como las ondas clásicas. Pese a ello, las partículas parecen comportarse como ondas en que muestran efectos de interferencia entre las diversas amplitudes que describen todo lo que la partícula podría hacer. La interferencia puede demostrarse mediante la dispersión de electrones por un retículo uniforme, ejemplificado por la disposición de los átomos en un cristal, y puede realizarse a una intensidad tan baja que sólo haya un electrón presente cada vez.

»Aquí en la tribuna frente a mí —continuó— ven una fuente de transiciones; transiciones que liberarán dos fotones en direcciones exactamente opuestas. Como saben, si midieran el espín de los

fotones en alguna dirección de su elección, siempre encontrarían que éstos tienen espín hacia *arriba* o hacia *abajo*, sin otra posibilidad intermedia.

Alicia no sabía eso, aunque había oído hablar de electrones con espín hacia arriba y con espín hacia abajo, pero el resto de los presentes hacía gestos afirmativos de personas enteradas, así que supuso que era cierto.

—Como digo, *si* se midiera el espín, se encontraría espín-arriba o espín-abajo, pero si *no* se mide, habrá una mezcla o, mejor, una superposición de estados que tienen diferentes direcciones de espín. Sólo cuando se realiza una medida se reducen las amplitudes. Entonces una estará presente y la otra desaparecerá. Ahora bien —dijo bruscamente—, la fuente que ven aquí realiza sus transiciones a partir de estados que no tienen ningún espín, así que el espín *total* de las dos partículas producidas debe ser también cero. Esto quiere decir —explicó amablemente— que los espines de ambos fotones deben ser opuestos: si uno tiene el espín hacia arriba, el otro lo ha de tener hacia abajo. Pero, recuerden, la dirección del espín de los fotones se selecciona de la superposición de estados sólo cuando se hace una medida; esto es lo que normalmente se cree. Entonces pueden ver que cuando se realiza una medida sobre un fotón hallando, digamos, que tiene espín hacia arriba, la superposición de amplitudes de ese fotón se reducirá al estado apropiado.

»Sin embargo —continuó Paradox alzándose todo lo que pudo—, la superposición correspondiente al *otro* fotón debe también reducirse, porque sabemos que este fotón debe tener el espín opuesto. Esto ha

de suceder independientemente de lo alejados que estén ambos fotones en ese instante, incluso si estuvieran en distintas estrellas.

»En esta demostración no realizaremos las medidas tan separadas —dijo sonriendo al público—. Llamo ahora a dos voluntarios, dos experimentadores de confianza que acepten ir a los extremos opuestos del País de los Cuantos y hagan las observaciones para nosotros.



Hubo un murmullo de discusiones entre la multitud congregada y dos personas fueron empujadas hacia delante. Ambos vestían largas levitas y pantalones estrechos y lucían espesas patillas. Los dos llevaban chalecos, ambos con una cadena de oro unida a un reloj puesto es crupulosamente en hora. No eran absolutamente idénticos, porque sólo las partículas lo son, pero desde luego eran muy parecidos. Ambos eran evidentemente honorables, honrados y dignos de confianza, así como competentes y concienzudos observadores. Si dijeran que habían visto algo, nadie osaría discutirlo.

Paradox le dio a cada uno un polarímetro, un instrumento con el que podían medir las direcciones del espín de las partículas. Los dos desmontaron el instrumento con precisión militar, lo examinaron para comprobar que no había nada raro y lo volvieron a montar rápidamente.



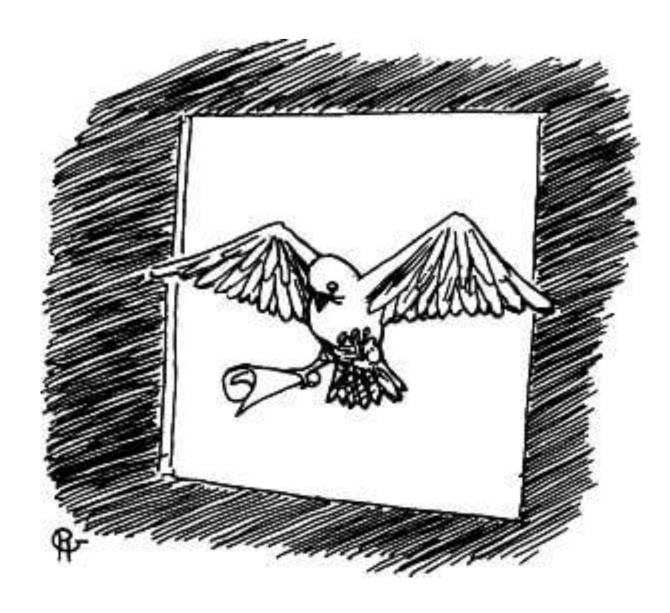
El empresario requirió entonces la presencia de dos atractivas asistentas que acompañaron a los voluntarios hasta los cilindros de metal y abrieron una puerta en un lado de cada uno de ellos. Por alguna razón ambos observadores se pusieron entonces un sombrero de copa antes de apretujarse en el reducido espacio de dentro. Las asistentas cerraron las puertas, encendieron una espoleta en la parte de atrás de cada cilindro y retrocedieron apresuradamente. Con un rugido, los cohetes se deslizaron rápidamente por la rampa y a través de las puertas del pabellón para proyectarse al horizonte hacia los extremos opuestos del País de los Cuantos.

—Y ahora esperemos hasta que lleguen —señaló el empresario—. Tan pronto como cada uno esté en posición, enviará un mensaje a través de su línea telegráfica. —Indicó dos timbres situados sobre unas mesitas a cada lado de la tribuna. Todo el mundo los miraba, esperando a que sonaran como señal de que el espectáculo podía continuar. Fue una larga espera.

—Todo el mundo parece muy paciente —señaló Alicia, que estaba empezando a impacientarse.

—Han de serlo —replicó el Mecánico Cuántico—. Todos los científicos experimentales tienen que aprender a desarrollar la paciencia.

Finalmente sonaron los timbres, primero uno y poco después el otro. Ello indicaba que ambos observadores se hallaban en posición, y, con un espectacular ademán, Paradox abrió las ventanas de ambos lados de su fuente de fotones. Los fotones empezaron a salir de dos en dos en direcciones opuestas.



Después de algún tiempo cerró de nuevo las ventanas y se produjo otra larga pausa.

«Me pregunto qué estamos esperando», —pensó Alicia, que tenía la impresión de que el experimento podría discurrir *algo* más rápidamente. Hubo un aleteo y una paloma mensajera salió a través de la ventana de un extremo del edificio, siendo expertamente

cazada por uno de los asistentes. Un poco después, otra paloma llegó desde la segunda ventana, y los mensajes transportados por las dos pudieron compararse. Paradox enseñó los dos mensajes, que mostraban una correlación perfecta: cuando un fotón tipo espín-arriba se detectaba en un lado, en el otro invariablemente se detectaba un fotón tipo espín-abajo, incluso aunque los detectores estuvieran tan alejados entre sí que no habría habido tiempo de intercambiarse ninguna información.

—¡No hay ningún misterio! —gritó alguien desde el lado opuesto de la gran sala. La voz provenía de una figura alta, a quien Alicia no podía ver claramente, pero que se parecía *bastante* al Mecánico Clásico—. Es evidente —prosiguió— que no es completamente incierto si los fotones tienen el espín hacia arriba o hacia abajo cuando salen de la fuente. De alguna manera saben lo que serán, y también saben que los dos han de ser opuestos. No importa entonces cuánto tengan que esperar antes de ser detectados; se descubrirá que tienen la dirección de espín ya decidida cuando se emitieron.

—Parece un argumento muy razonable, ¿no? —dijo sonriente el empresario, que no parecía abatido en absoluto—; tendremos que extender un poco nuestra demostración.

—Dice usted que el que los fotones tengan espín hacia arriba o hacia abajo está ya decidido desde el momento de su emisión, y que ellos llevan esa información consigo cuando viajan. ¿Qué sucedería si nuestros dos observadores se dispusieran a medir el espín en otras direcciones, digamos izquierda y derecha, o alguna otra

intermedia? ¿Y qué sucedería si giraran su polarímetro cuando les apeteciera sin informarnos y sin colaborar entre ellos? ¿Sería posible que la fuente supiera de antemano qué información debería transmitir con las partículas, de manera que sus espines casaran propiamente *cualesquiera*fueran los ángulos escogidos por nuestros amigos en sus medidas? ¡Creo que no!

Escribió rápidamente nuevas instrucciones para los observadores, ató las notas a las patas de la palomas y envió éstas de vuelta adonde habían salido. Tras una pausa, los timbres del telégrafo sonaron otra vez indicando que los mensajes se habían recibido y entendido. De nuevo, con un ademán triunfal, abrió las ventanas de la fuente central y dejó que los fotones fluyeran al exterior. Después de un período conveniente, volvió a cerrar las ventanas y se produjo otra pausa.

Alicia se sentía cansada de esperar algún acontecimiento cuando, por fin, se oyó un ruido en cada uno de los lados que se hizo cada vez más intenso, y entonces los dos cohetes salieron de las puertas en los extremos del edificio y volvieron a posarse en las rampas de donde habían partido.

Cuando los achatados cilindros reposaban humeando suavemente, se abrieron las puertas y de cada una salió uno de los observadores, llevando todavía su formal sombrero de copa. Ambos se acercaron al empresario, se quitaron los sombreros, inclinaron la cabeza y le enseñaron sus notas. Por lo que Alicia pudo distinguir, todo el mundo salvo ella se arremolinó en torno al empresario tratando cada uno de ser el primero en echar un vistazo a los resultados.

Hubo un enorme murmullo de discusiones y todos empezaron a hacer sus cálculos. Alicia vio gente con pequeños ordenadores portátiles, con calculadoras electrónicas y hasta con reglas de cálculo. Vio también a alguien con una extraña calculadora mecánica que tenía pequeñas ruedas dentadas. Los chinos que había observado antes habían sacado un ábaco, y sus expertos dedos deslizaban las cuentas adelante y atrás a lo largo de los alambres tan rápidamente que los ojos de Alicia no podían seguirlos. Incluso el peludo caballero con pieles de animal estaba en el asunto. Había abandonado su rueda y llevaba a cabo un complicado procedimiento de cálculo con varios montoncitos de tabas blanqueadas.

Finalmente los grupos de discutidores se calmaron y llegaron a la misma conclusión. Era cierto, dijeron, que existía un inexplicable acuerdo entre las direcciones de espín de los dos fotones. Incluso cuando se realizaban cambios en las direcciones a lo largo de las cuales se medían los espines, las correlaciones observadas eran mayores de lo que podría explicar cualquier información enviada con las partículas. Todo era muy claro, acordaron; de hecho tan claro como una campana[22]. No le pareció tan claro a Alicia, pero, si todo el mundo así lo creía, supuso que sería cierto.

—Ése es un resultado muy interesante —señaló el Mecánico Cuántico al volver de entre la multitud. La mayoría de los presentes seguía discutiendo de modo acalorado, a pesar de que parecían

[22] En el original, *clear as a bell*. La frase no tiene mucho sentido en español. Está introducida algo forzadamente en alusión a John Bell, físico que analizó por primera vez ese tipo de correlaciones cuánticas; véase la nota 2 de final del capítulo. (*N. del T.*)

estar todos completamente de acuerdo—. Muestra que el comportamiento de la función de onda en lugares diferentes no puede ser causado por mensajes pasados de una posición a otra. Sencillamente, no hay tiempo para ello. Presenta un Aspecto[23] completamente nuevo de la naturaleza cuántica.



Tal vez era interesante, pero Alicia tenía la impresión de haber estado demasiado tiempo sentada esperando y le gustaría más acción, de modo que abandonaron el pabellón y fueron a investigar los aparatos de montar.

—Tienes que comportarte como una partícula cargada para montar en uno de esos aparatos —señaló el Mecánico Cuántico—. Todos ellos operan mediante aceleración eléctrica, así que sólo funcionan para partículas cargadas. Como eres una especie de partícula honoraria, no veo ninguna razón para que no seas una partícula cargada con igual facilidad que puedes ser una partícula sin carga.



[23] Análogamente, en alusión a Alain Aspect, quien verificó experimentalmente las desigualdades de Bell; véase la misma nota. (*N. del T.*)

Habían llegado a un edificio largo y estrecho en el que había un anuncio que decía:

¡MÓNTATE EN LA ONDA!
Móntate en la onda electromagnética milla tras milla (Eso hace dos millas; cuéntalas: 2.)

Había una excitada cola de electrones fuera, esperando su turno para subir, pero Alicia pensó que ése no era el tipo de viaje que deseaba por el momento. Iría mejor en algo como la Gran Noria, en la que había montado en una feria cerca de su casa. Mencionó esto a su acompañante, que le dijo que la llevaría a las máquinas circulares. Cuando se dirigían allí, se cruzaron con un desfile. Había una sucesión de cochecitos, en cada uno de los cuales se hallaba en equilibrio un enorme aparato construido en torno a un vasto imán con hilos de cobre enrollados a su alrededor y varios intrigantes dispositivos empotrados en su centro. De todos ellos serpenteaban grandes amasijos de hilos y cables.

—¿Cómo pueden esos cochecitos soportar todo ese peso? —preguntó Alicia—. Lógicamente tendrían que ser aplastados por tan enormes masas de metal.

—¡Oh!, lo serían si las piezas del equipo fueran *reales*, pero éste es el Desfile para Financiación de Experimentos, de modo que cada uno de ellos es sólo una propuesta. Son como los experimentos que hicimos en nuestra sala *gedanken*. Sólo son ideas por el momento, nada real en absoluto, así que no son muy pesados. De hecho, la mayoría de los cochecitos acarrea muy poco peso verdaderamente.

Alicia miró la procesión y observó que el segundo cochecito llevaba un aparato exactamente igual que el primero, el tercero otro igual, y el cuarto, quinto, sexto, y así sucesivamente hasta donde el desfile era visible.

—No parece haber mucha variedad —señaló Alicia.

—Eso es porque de cada propuesta deben presentarse múltiples copias —replicó su compañero—. Habrá alguno diferente a su debido tiempo.

Cuando contemplaban el paso de las carrozas, el aire se llenó con una «nevada» de trozos irregulares de papel.

—Solicitudes rehusadas —dijo el Mecánico Cuántico antes de que Alicia pudiera preguntar—. Ven, mejor vamos a encontrar tu aparato.

Pasaron una sucesión de norias. Estaban todas de costado en vez de hacia arriba, como estarían en una feria normal, y el acompañante de Alicia le dijo que en el Parque de Atracciones las llamaban «anillos» y no norias. Estaban el Anillo Grande, el Anillo

Mucho Más Grande y el Anillo CERN Verdaderamente Enorme[24]. Alicia decidió que deseaba montar en este último.

Se alineó codeándose con un grupo de protones, y enseguida entró en la máquina y se sentó, o fue «inyectada», como decían ellos, en un *elemento de haz*; era una especie de recinto eléctrico que Alicia compartía con una muchedumbre de protones que circulaban excitadamente en todas direcciones. Se movieron acelerados por intensos campos que tiraban de sus cargas eléctricas. Al adquirir velocidad, los protones se tranquilizaron y empezaron a moverse juntos hacia delante.

Iban cada vez más deprisa, guiados en sus vueltas por campos magnéticos. Después de un tiempo, Alicia empezó a notar que su velocidad ya no aumentaba mucho, aunque aún podía sentir una aceleración. Preguntó acerca de esto a uno de los protones y éste le dijo que estaban yendo casi tan rápidamente como los fotones, y nada podía ir más rápido, pero que su *energía cinética* seguía aumentando. Esto le pareció extraño a Alicia, y estaba a punto de discutirlo cuando se produjo de repente una sacudida y se sintió despedida del anillo junto con los protones.

Se desplazó a través del aire a una velocidad que parecía increíble. Cuando miró hacia delante, se aterró al ver una pared justo enfrente y al darse cuenta de que ella y los protones iban directamente hacia allí. Se preparó para la colisión, pero ante su

[24] CERN, antes Centro Europeo de Investigación Nuclear y ahora Laboratorio Europeo de Física de Partículas; se dedica a la investigación en física de altas energías y está situado en Ginebra. (*N. del T.*)

gran sorpresa la pared la detuvo como lo haría una niebla o un sueño.

Forma parte de la paradoja de la física cuántica el que las medidas en objetos muy pequeños hayan de realizarse con aceleradores de partículas enormemente grandes. Debido a la relación de Heisenberg, un tamaño pequeño está acoplado con un momento grande, y se requiere una máquina grande para acelerar las partículas hasta las enormes energías necesarias. La mayoría de los aceleradores de muy alta energía son circulares, y las partículas dan muchas vueltas en el proceso de ser aceleradas. Existen unos cuantos grandes aceleradores lineales, en los que se aceleran electrones a lo largo de una trayectoria rectilínea; destaca el llamado «Linac» en Stanford, California, con más de 3 000 km de longitud.

Miró a su alrededor y vio que, aunque la pared había tenido poco efecto sobre ella, lo contrario no era cierto. Se cruzó de alguna manera con un átomo y éste se rompió en pedazos, con los electrones expulsados hacia fuera y el núcleo vagando libremente por su cuenta. A su alrededor pudo observar un gran conjunto de fotones virtuales. Éstos se precipitaban hacia los átomos que cruzaba dando la impresión de una red de telarañas desgarradas por el efecto lejano de su paso. Llegó junto a un núcleo y éste

también se rompió, con los protones y neutrones dispersos en todas direcciones. Desalentada, se acordó del jinete cósmico que había visto en el Castillo Rutherford, y que había destrozado sin esfuerzo un castillo nuclear. Ahora se sintió horrorizada al darse cuenta de que se había hecho como él, ¡dejando una amplia estela de destrucción entre los núcleos y átomos con los que se cruzaba!

Alicia vio un neutrón justo delante un momento antes de abrirse paso a través de él. Echó una rápida mirada a los tres quarks, muertos de miedo ante su paso. No fueron arrojados individualmente fuera del neutrón porque estaban firmemente ligados entre sí, pero sus cadenas se estiraron y se rompieron, produciendo una multitud de pares quark-antiquark. Donde previamente había permanecido el neutrón, ahora había un gran chorro de mesones impulsados por el efecto del enorme momento de Alicia.

Alicia se tapó los ojos para borrar la imagen del caos a su alrededor, no fuera a ser que viera algunas catástrofes aún más violentas. Tuvo una breve sensación de caída y sintió un pequeño batacazo.

Alicia abrió rápidamente los ojos, descubrió que se había caído del sofá en su propia habitación y estaba en el suelo. Se levantó con presteza y miró a su alrededor. El sol brillaba alegremente a través de la ventana y la lluvia había desaparecido. Se dio la vuelta para ver la televisión, que estaba aún encendida. En la pantalla se veía un grupo de gente bastante seria sentada en torno a un estudio y colocada cuidadosamente a cada lado de un presentador, quien

informó a Alicia de que estaban a punto de comenzar una discusión sobre el futuro de la planificación de la ciencia en el país.

Las partículas de alta energía producidas en los aceleradores pueden penetrar considerablemente en la materia ordinaria. Tienen unas energías tan grandes comparadas con las energías de enlace entre los átomos que éstos poco pueden hacer para detenerlas. Dichas partículas dejan una estela de ionización y enlaces rotos a lo largo de su trayectoria. Si pasan cerca del núcleo de un átomo, también lo fragmentan. Con el tiempo, estas partículas rápidas pierden toda su energía a través de tales procesos, pero pueden recorrer un largo camino.



—Aburrido —dijo Alicia. Apagó decididamente la televisión y salió fuera a disfrutar del sol.

---

[a] La mecánica cuántica se contrasta usualmente con la mecánica clásica o newtoniana. Ésta describe detalladamente el movimiento de objetos; fue desarrollada plenamente antes de los primeros años del siglo XX y se basó en el trabajo original de Galileo, Newton y otros estudios anteriores y posteriores a ellos. La mecánica newtoniana funciona bien en una escala grande. Puede predecirse el movimiento de los planetas para tiempos grandes y con gran precisión. Funciona casi igual de bien para satélites artificiales y misiones espaciales exploratorias. Sus posiciones pueden predecirse para períodos de varios años. También funciona muy bien para la caída de las manzanas. En este caso, la manzana que cae tendrá una resistencia significativa en el aire que la rodea. La mecánica clásica describe esta resistencia como la colisión de un enorme número de moléculas que rebotan en la manzana. Cuando se pregunta (en el marco de la mecánica clásica) acerca de las moléculas del aire, la respuesta es que son pequeños grupos de átomos. Si se pregunta sobre los átomos, se produce un silencio turbador.

La mecánica clásica apenas tuvo éxito al describir la naturaleza del mundo en la escala atómica. Las cosas han de ser de alguna manera diferentes para los objetos pequeños de lo que parecen ser para los más grandes. Si se argumenta así, se debe preguntar: ¿grande o pequeño con respecto a qué? Debe haber alguna dimensión, alguna constante fundamental, que fije el tamaño en el que este comportamiento se hace evidente. Es un cambio bien definido en el comportamiento observado de las cosas, y es universal. Los átomos en el sol y en estrellas lejanas emiten luz con un espectro que es como el de la luz de una lámpara que esté en una mesa a nuestro lado.

El comienzo del comportamiento cuántico no es algo que simplemente tiene lugar localmente; está involucrada alguna propiedad fundamental de la naturaleza. Este hecho viene dado por la constante fundamental $\hbar$, que aparece en la mayoría de las ecuaciones de la mecánica cuántica. El mundo es *granulado* en la escala definida por esta constante $\hbar$. En esta escala de energía y tiempo, la posición y el momento son ambos borrosos. Apenas se necesita puntualizar que, en la escala de la percepción humana, $\hbar$ es ciertamente muy pequeña y la mayoría de los efectos cuánticos no son evidentes en absoluto.

[b] Lo que nos dicen las relaciones de incertidumbre de Heisenberg es que estamos mirando las cosas de manera equivocada. Tenemos la idea preconcebida de que *debemos* ser capaces de medir la posición y el momento de una partícula al mismo tiempo, pero resulta que no lo somos. No está en la naturaleza de las partículas el que podamos realizar tal medida sobre ellas, y la teoría nos dice que estamos formulando preguntas erróneas, para las cuales no hay ninguna respuesta viable. Niels Bohr utilizó la palabra *complementariedad* para expresar el hecho de que puede haber conceptos que no pueden definirse con precisión al mismo tiempo: pares tales como justicia y legalidad o emoción y racionalidad.

Hay, parece claro, algo fundamentalmente equivocado en nuestra creencia de que *deberíamos* poder hablar de la posición y del momento de una partícula, o de su energía exacta en un instante dado. No resulta claro por qué debería tener sentido hablar simultáneamente de dos cantidades diferentes tales, pero ocurre que no lo tiene.

[c] La mecánica cuántica no trata realmente de partículas definidas en el sentido clásico tradicional; en lugar de ello se habla de *estados* y *amplitudes*. Si se toma el *cuadrado* de una

amplitud (es decir, se multiplica por sí misma), se tiene una distribución de probabilidad que da la *probabilidad* de obtener diversos resultados al realizar una observación o medida. El valor real que se obtiene para cada medida resulta ser completamente aleatorio e impredecible. Así que parece como si la sugerencia hecha antes de que la naturaleza es incierta y «cualquier cosa vale» debe, después de todo, ser verdadera, ¿no? Bueno, no; si se hacen muchas medidas, el resultado *promedio* se predice exactamente. Los corredores de apuestas no saben qué caballo ganará cada carrera, pero confían en obtener un resultado provechoso al final de la jornada. No prevén grandes pérdidas insospechadas, incluso aunque tienen que trabajar con números bastante pequeños, de manera que el promedio no es demasiado fehaciente. El número de apostantes podrá ser de unos cuantos miles de personas y no los 1 000 000 000 000 000 000 000 000 o más átomos que se tienen en un pedacito de materia. Las fluctuaciones estadísticas globales en las medidas realizadas en un número tan grande de átomos son despreciables, aunque el resultado para cada uno de ellos en particular puede ser completamente aleatorio. Las amplitudes mecánico-cuánticas pueden calcularse con mucha precisión y compararse con los experimentos.

Un resultado citado frecuentemente es el del momento magnético del electrón. Los electrones giran como trompos y también tienen propiedades eléctricas, comportándose como pequeñas barras imantadas. La intensidad magnética y el espín del electrón están relacionados, y su cociente puede calcularse usando unidades adecuadas. Un cálculo clásico arroja el resultado 1 (con suposiciones bastante arbitrarias acerca de la distribución de la carga eléctrica en un electrón).

El cálculo cuántico da 2,0023193048 (±8) (el error se refiere al último decimal).

Una medida ha dado el resultado 2,0023193048 (±4). ¡Excelente acuerdo! La probabilidad de obtener por casualidad un valor con un acuerdo así de bueno es similar a la probabilidad de lanzar un dardo al azar y dar en el centro de una diana que estuviera en la Luna. Este resultado concreto se pone frecuentemente como ejemplo del éxito de la teoría cuántica. Es posible calcular las amplitudes para otros procesos con la misma precisión, pero existen muy pocas magnitudes que puedan *medirse* con tal precisión.

[d] El «problema de la medida» es que la selección de una sola posibilidad y la reducción de las otras amplitudes son completamente distintas de cualquier otro proceso cuántico, y no es evidente cómo pueden tener lugar. El problema se formula sencillamente así: ¿Cómo puede medirse realmente algo? El punto de vista convencional de la mecánica cuántica es que cuando existen varias posibilidades, estará presente una amplitud para cada una de ellas, y la amplitud total para el sistema es la suma, o superposición, de todas ellas. Por ejemplo, si hay varias rendijas por las cuales puede pasar una partícula, entonces la amplitud total para el sistema contiene una amplitud para cada rendija y puede tenerse interferencia entre las amplitudes individuales. Si el sistema se deja a sí mismo, las amplitudes cambiarán de una forma suave y predecible. Cuando se realiza una medida en un sistema que tiene una suma de amplitudes que corresponden a posibles valores diferentes de la cantidad medida, la teoría afirma que se observará, con cierta probabilidad, uno u otro de esos valores. Inmediatamente después de la medida, el valor es una cantidad conocida (porque se ha medido), de modo que la suma de autoestados (véase recuadro de la página 132) se reduce a uno solo, el correspondiente al valor real que se ha medido.

[e] La descripción ortodoxa en mecánica cuántica de una medida tiene el inconveniente de que el proceso de medición no parece compatible en modo alguno con el resto de la teoría cuántica. Si la teoría cuántica es la teoría correcta para los átomos, como parece ser el caso, y si todo lo que existe en el mundo está constituido por átomos, entonces la teoría cuántica debería

presumiblemente aplicarse a todo lo existente en el mundo, lo cual incluye los instrumentos de medida. En el caso de que en un sistema cuántico pueda haber varios valores, la amplitud del mismo es una suma de estados correspondientes a cada valor posible. Puesto que el aparato de medida es él mismo un sistema cuántico, y hay varios valores que *podría* medir, no tiene ningún derecho a seleccionar justo uno de ellos.

Debería encontrarse en un estado que es la suma de las amplitudes para todos los posibles resultados que podría medir, y entonces no *podría* hacerse ninguna observación única.

La conclusión que se sacaría de lo de arriba parecería ser la alternativa:

a) Nunca observamos nada

o

b) La teoría cuántica es un completo disparate.

Ninguna de ellas puede mantenerse (aunque la opción *b* podría resultar tentadora).

Sabemos perfectamente bien que observamos realmente cosas, pero, por otra parte, la teoría cuántica tiene un éxito ininterrumpido en la descripción de todas las observaciones, al tiempo que no existe ninguna teoría que funcione tan bien. No podemos, pues, abandonarla a la ligera.

[f] En el caso de muchas partículas, se tendrá una especie de amplitud para cada una de ellas y una amplitud total que describirá el conjunto completo de las mismas. Si las partículas son diferentes entre sí, se sabe (o *puede* saberse) el estado en que se halla cada una. La amplitud total es entonces el producto de las amplitudes de cada partícula por separado.

Si las partículas son idénticas entre sí, las cosas resultan más complicadas. Los electrones (o fotones) son completamente idénticos. No hay *ninguna manera* de distinguir uno de otro. Cuando se ha visto uno, se han visto todos. No puede en ningún caso saberse si se han intercambiado dos electrones entre los estados que ocupaban (es decir, si uno se ha puesto en el estado del otro, y viceversa). La amplitud total es, lógicamente, una mezcla de todas las partículas indistinguibles, la cual ahora incluye todas las permutaciones en las que las partículas se han intercambiado entre dos estados. El intercambio de dos partículas idénticas no tiene ningún efecto sobre lo que se observa, lo cual significa que no afecta a la distribución de probabilidad obtenida multiplicando la amplitud por sí misma. Esto podría significar que la amplitud no cambia, o *podría* significar que cambia de signo, pasando de positiva a negativa, por ejemplo. Esto último equivale a multiplicar la amplitud por –1. Cuando se multiplica la amplitud por sí misma para obtener la probabilidad, este factor –1 se multiplica también por sí mismo para dar un factor +1, lo cual no da lugar a ningún cambio en la probabilidad. El cambio de signo parece una cuestión académica trivial, pero tiene consecuencias sorprendentes.

[g] No hay ninguna razón evidente para que una amplitud *deba* cambiar de signo simplemente porque no pueda demostrarse que no puede hacerlo, pero la naturaleza parece seguir la regla de que lo que no está prohibido es obligatorio y asumir todas sus opciones. *Existen* partículas para las que la amplitud cambia de signo cuando se intercambian dos de ellas. Se llaman *fermiones*, y los electrones proporcionan un ejemplo. Existen también partículas para las que la amplitud no cambia en absoluto cuando se intercambian dos de ellas. Éstas se llaman *bosones*, y los fotones son de este tipo.

¿Importa realmente mucho si el signo de la amplitud para un sistema de partículas cambia o no cuando dos de ellos permutan sus estados? Sí importa, sorprendentemente, y mucho.

No puede haber dos fermiones en el mismo estado. Si dos bosones se hallaran en el mismo estado y se intercambiaran, ello no produciría diferencia alguna; ni siquiera daría lugar a un cambio de signo. Tales amplitudes no son permitidas para los fermiones. Éste es un ejemplo del principio de Pauli, que asegura que en ningún caso dos fermiones pueden encontrarse en el

mismo estado. Los fermiones son los fundamentalistas del individualismo; no hay dos de ellos que hagan exactamente lo mismo. El principio de Pauli es enormemente importante y es vital para la existencia de los átomos y de la materia tal como la conocemos. Los bosones no se rigen por el principio de Pauli; de hecho, todo lo contrario.

Si cada partícula se halla en un estado diferente y se hace el cuadrado de la amplitud total para calcular la distribución de probabilidad para las partículas, cada partícula por separado contribuye en la misma proporción a la probabilidad total. Si hay dos partículas en el mismo estado y se hace el cuadrado, se obtiene cuatro veces la contribución de una de ellas. Cada una de las partículas contribuye proporcionalmente más, así que tener dos partículas en el mismo estado es *más* probable que tenerlas en estados diferentes. Tener tres o cuatro en el mismo estado es incluso más probable, y así sucesivamente. Esta probabilidad creciente de tener cada vez más bosones en el mismo estado es lo que da lugar al fenómeno de la condensación bosónica: los bosones gustan de agruparse en el mismo estado; además son fáciles de dirigir y son gregarios por naturaleza. La condensación bosónica se ve, por ejemplo, en el funcionamiento de un láser.

[h] Las fuerzas eléctricas que involucran a los electrones pueden operar a fin de mantener unidos los átomos, como se discute en el capítulo 7, pero no pueden dar lugar a ninguna repulsión que separe los átomos entre sí; entonces ¿por qué éstos se mantienen claramente separados? ¿Por qué son los sólidos incompresibles? ¿Por qué los átomos no se precipitan uno sobre otro, de manera que un trozo de plomo acabara como un objeto muy pesado de tamaño atómico?

Una vez más, ello es consecuencia del principio de Pauli, que asegura que dos electrones no pueden estar en el mismo estado.

Puesto que los átomos de un tipo dado son todos iguales, cada uno de ellos tiene el mismo conjunto de estados. ¿No pondría esto en el mismo estado electrones equivalentes de cada átomo, lo que no estaría permitido? En realidad, como los átomos están en posiciones diferentes, son ligeramente diferentes. Si se superpusieran los átomos, los estados *serían* iguales, algo que el principio de Pauli prohíbe. Los átomos se mantienen separados en virtud de la llamada «presión de Fermi», que en realidad es una fuerte oposición por parte de los electrones de un átomo a ser iguales a los del vecino. La materia es incompresible debido al individualismo extremo de los electrones.

[i] En un sólido los estados electrónicos de los átomos individuales se combinan entre sí para dar lugar a un gran conjunto de estados que pertenecen al sólido globalmente. Estos estados se agrupan en bandas de energía, dentro de las cuales los niveles de energía de los estados están tan próximos entre sí que forman casi un continuo. Existen brechas en las bandas de energía de los sólidos correspondientes a separaciones mayores de los niveles de energía de los átomos. Las bandas inferiores están llenas de electrones provenientes de los niveles inferiores de los átomos. La banda superior de estas bandas llenas se denomina «banda de valencia», y por encima de ella, separada por una brecha que no contiene ningún estado, hay otra banda: la «banda de conducción». Esta banda se halla o completamente vacía o, como mucho, parcialmente llena. En la banda de valencia los electrones no pueden moverse. Cualquier movimiento de un electrón requiere el cambio de un estado a otro, y no hay estados vacíos a los que puedan ir los electrones. Si se aplicara un potencial eléctrico a cierto material, se ejercería una fuerza sobre los electrones de la banda de valencia, pero éstos no podrían moverse. Si no hubiera electrones en la banda de conducción, ese material se comportaría como un aislante eléctrico.

[j] Si a un electrón en la banda de valencia llena se le proporciona suficiente energía, por una colisión con un fotón o incluso mediante una concentración fortuita de energía térmica,

entonces el electrón puede ascender a través de la brecha de energía hasta la banda de conducción superior. Como hay una gran cantidad de estados vacíos en esta banda, el electrón puede moverse allí, y un potencial eléctrico producirá conducción. Además, ahora hay un espacio libre en el nivel de valencia, donde estaba el electrón. Otro electrón puede moverse a ese hueco y así sucesivamente. Habrá un hueco en la, de otro modo llena, banda de valencia, y éste se moverá en sentido opuesto a como lo hace el electrón. El comportamiento de este hueco es muy parecido al de una partícula de carga positiva.
Lo anterior describe el comportamiento de los materiales semiconductores, como el silicio, usado ampliamente en electrónica. La corriente eléctrica es transportada por electrones en el nivel de conducción y por *huecos* en el nivel de valencia.
[k] Si un fotón que tiene la energía adecuada interactúa con un electrón en un átomo, se puede producir una transición de un nivel de energía a otro, como se describe en el capítulo 6. En la mayoría de los casos, la transición será de un nivel de energía inferior a otro superior, ya que normalmente los niveles más bajos están todos llenos. El fotón es igualmente capaz de producir una transición de un nivel superior a otro inferior, si éste está vacío. Si ocurre que una sustancia tiene una gran cantidad de electrones en un nivel superior, y un nivel inferior está mayormente vacío (condición conocida como *inversión de población*), entonces un fotón puede causar la transferencia de un electrón de un estado superior a otro inferior. Este cambio libera energía y crea un nuevo fotón, además del que ha causado la transferencia. Este fotón puede a su vez inducir a que más electrones caigan a un estado más bajo.
En un láser, la luz producida se refleja adelante y atrás entre los espejos en los dos extremos de la cavidad, originando más emisiones de fotones cada vez que pasa repetidamente a través del material. Algo de esta luz se escapa a través de los espejos, que no son perfectos reflectores, y proporciona un intenso haz estrecho: la luz láser. Como los fotones se emitieron como respuesta directa a los fotones ya presentes, la luz «marca completamente el paso», está *en fase*, y tiene propiedades únicas para producir efectos de interferencia en gran escala, como puede verse en los hologramas. (No todos los hologramas necesitan luz láser, pero ésta sirve de ayuda.)
[l] En los átomos, los estados permitidos para los electrones tienen niveles de energía ampliamente separados y los electrones sólo pueden ocupar esos niveles. Un electrón puede moverse de uno de esos estados si va a otro (vacío), y al hacerlo su energía cambia en una cantidad definida, la diferencia de energías de los dos estados. Un átomo en su estado normal, o *fundamental*, tiene sus niveles más bajos de energía uniformemente llenos de electrones, pero existen niveles de energía más alta que están normalmente vacíos. Cuando se excita uno de esos electrones, éste acabará en uno de estos niveles más altos o saldrá fuera del átomo. Un electrón que ha sido excitado a un nivel más alto puede volver a caer a un nivel de energía inferior si hay disponible algún estado vacío. Cuando el electrón se mueve a un nivel de energía inferior, debe librarse de la energía sobrante, lo que hace emitiendo un fotón. Así es como los átomos emiten luz. Debido a que todos los electrones ocupan estados definidos en el interior del átomo, cualquier fotón emitido puede tener sólo una energía igual a la diferencia de las poseídas por los estados inicial y final del electrón. Ello proporciona un gran número de posibilidades, pero con todo impone una restricción sobre la energía que puede tener un fotón. La energía del fotón es proporcional a la frecuencia de la luz y en consecuencia a su color, de manera que el espectro de la luz producida por un átomo consiste en una serie de «líneas» coloreadas de frecuencias específicas. El espectro de un tipo dado de átomo es completamente característico de éste. La física clásica no proporciona explicación alguna de estos espectros.

[m] Las partículas cuánticas tienen una borrosidad característica, tanto en tiempo como en energía. Esta borrosidad se manifiesta como fluctuaciones de energía en las que las partículas se comportan como si tuvieran más (o menos) energía que la que deberían tener. Puede asimismo aparecer como una incertidumbre en el tiempo. En un sistema cuántico las partículas parecen poder estar en dos sitios a la vez (o al menos poseen amplitudes que lo están). Las partículas pueden incluso invertir el sentido del tiempo. El físico Richard Feynman describe las antipartículas como «partículas que viajan hacia atrás en el tiempo» {Richard Feynman: *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Penguin, Nueva York. Hay traducción española de esta obra de Feynman, Premio Nobel de Física de 1965: *Electrodinámica cuántica*, Alianza Editorial, Madrid, 1988. *(N. del T.)*}. Esto explica la manera en que las propiedades de las antipartículas son opuestas a la de las partículas. Una carga eléctrica negativa transportada hacia atrás en el tiempo es equivalente a una carga positiva que se mueve hacia el futuro; en ambos casos, la carga positiva crece en el futuro, y un electrón (cargado negativamente) viajando hacia el pasado se ve como un positrón (con carga positiva), que es la antipartícula de aquél. Toda partícula tiene su correspondiente antipartícula, como es de esperar si ésta es en efecto la misma partícula comportándose de modo opuesto.

[n] Primeramente se descubrió que los átomos contenían partículas ligeras con carga negativa, electrones, y después se halló que además tenían un núcleo de carga positiva, lo que sugirió que podrían ser versiones muy reducidas del sistema solar, con electrones planetarios en órbita alrededor de un sol nuclear. Esta idea dio lugar a fantasías en las que los electrones eran ciertamente planetas en miniatura, con gente en miniatura que los habitaba, y así sucesivamente *ad infinitum*. Desgraciadamente para estos esquemas, la imagen tipo «sistema solar» es claramente incorrecta.

- La única razón por la que los planetas no caen directamente sobre el Sol es que orbitan alrededor de él. Hay clara evidencia de que muchos electrones no realizan rotación alguna en torno al núcleo.
- De acuerdo con la física clásica, los electrones en órbitas dentro de los átomos deberían radiar energía, y su movimiento sería finalmente de caída al núcleo. En algo tan pequeño como un átomo, esto ocurriría muy rápidamente, en menos de una millonésima de segundo, y los átomos no se desploman de esta manera. (Los planetas están, de hecho, acercándose al Sol, pero muy lentamente, en escalas temporales de muchos millones de años.)

[o] Debido al principio de Pauli, sólo hay un electrón en cada estado. Como los electrones se hallan disponibles en las versiones *espín arriba* y *espín abajo*, esto dobla efectivamente el número de estados. Los electrones caerán en los estados atómicos porque allí tienen menos energía, y por regla general las cosas tienden a caer a los niveles de energía más bajos (como puede descubrirse sosteniendo una copa por encima del suelo y dejándola después libre). Todo átomo tiene un gran número de niveles que podrían mantener electrones; de hecho, el número de estados es infinito, aunque los más altos tienen energías muy parecidas y están por ello muy juntos. Un átomo continuará atrayendo electrones a sus niveles sólo hasta que contenga el número correcto para compensar la carga positiva del núcleo, tras lo cual el átomo ya no tiene ninguna carga positiva en exceso con la que atraer más electrones. Cuando un átomo ha alcanzado su asignación completa de electrones, en casi todos los casos tendrá más de los que pueden acomodarse en el estado de más baja energía, y algunos electrones deberán hacerlo en estados de energía más alta.

[p] Cuando se observó la luz emitida por átomos de un único tipo, se descubrió que el espectro no era una mezcla uniforme de colores como un arco iris, sino un conjunto de bandas estrechas, cada una de distinto color. Todas las clases de átomos mostraban estas *líneas espectrales*, que eran un completo misterio para la física clásica.

El conjunto de niveles de energía de los electrones es único para cualquier tipo de átomo. Cuando los electrones pasan de un nivel a otro emiten fotones que tienen una energía que corresponde a la diferencia de energías de ambos niveles. Como la energía de los fotones es proporcional a la frecuencia y al color de la luz, se produce un espectro de líneas ópticas que es tan distintivo de cada átomo como una huella dactilar.

La explicación de la existencia de un espectro constituido por líneas fue el primer éxito importante que tuvo la teoría cuántica en sus comienzos. La teoría se ajustaba a las frecuencias de las líneas observadas y predecía otras que no se habían visto. Éstas se observaron en su momento y mostraron que la teoría cuántica no podía dejarse de lado.

[q] En el mundo físico, casi todo puede contemplarse como debido a la interacción entre electrones y fotones, virtuales o reales. Las propiedades de los sólidos, de los átomos individuales, y el comportamiento químico que surge de la interacción entre los átomos, todo ello se reduce a una interacción eléctrica entre los electrones. Además de los electrones, que interactúan con el resto del mundo, existe dentro del átomo un núcleo cargado positivamente. El núcleo no se mantiene unido mediante fuerzas eléctricas; de hecho, todo lo contrario.

El núcleo atómico contiene neutrones, que no tienen carga eléctrica, y protones, que tienen carga positiva. Dentro del pequeño espacio del núcleo, cuyo radio es cien mil veces más pequeño que el tamaño del átomo, la fuerza repulsiva mutua de los protones es enorme. Esta fuerza eléctrica tiende a desgarrar el núcleo, así que debe haber una fuerza aún mayor que lo mantenga compacto y que, por alguna razón, no se evidencie en otros lugares. Tal fuerza existe, y se llama *interacción nuclear fuerte*. Pero, aunque es fuerte, tiene un alcance muy corto, de modo que sus efectos no son evidentes fuera del núcleo. Esta interacción fuerte está producida por el intercambio de partículas virtuales, justo como la interacción eléctrica está producida por el intercambio de fotones. Los fotones no tienen masa en reposo, pero las partículas intercambiadas en la interacción fuerte son relativamente pesadas. Éstas deben obtener su masa en reposo a través de una fluctuación cuántica particularmente grande, lo cual resulta posible sólo durante un tiempo muy corto. Además, estas partículas pesadas virtuales tienen una vida muy corta y son incapaces de viajar lejos de su fuente, de manera que la interacción que producen es, en consecuencia, de corto alcance.

[r] Los protones y neutrones que habitan el núcleo (conocidos colectivamente como nucleones) son ejemplos de partículas con interacción fuerte, también llamadas *hadrones*. Existen otros muchos hadrones, aunque no todas las partículas interactúan fuertemente. Las partículas conocidas como *leptones* no sienten en absoluto la interacción fuerte. Los electrones pertenecen a esta clase y por tanto no están confinados dentro del núcleo junto a los nucleones. Son conscientes del núcleo sólo como una carga eléctrica positiva que los mantiene levemente ligados en el átomo. En experimentos de física de altas energías, se han descubierto centenares de partículas con interacción fuerte, un escenario muy familiar en física. Siempre que una clase contiene un gran número de miembros, éstos normalmente resultan estar compuestos de algo más básico. Los diversos elementos químicos identificados están todos compuestos de átomos. Existen 92 variedades de átomos naturales estables, y todos ellos están compuestos de electrones situados en diferentes números alrededor de un núcleo central. Los núcleos a su vez se componen de neutrones y protones ligados mediante el intercambio de piones. Éstos se mencionan en el capítulo precedente. El neutrón y el protón son dos miembros de una clase

con centenares de ellos: K, ρ, ω, Λ, Σ, Ξ, Ω, Δ, etc. En la actualidad se sabe que todas estas partículas están compuestas de quarks.

[s] Los quarks se mantienen unidos por fuerzas en cierto modo parecidas, y en cierto modo no, a la interacción eléctrica. Estas fuerzas no actúan sobre la carga eléctrica, sino sobre algo distinto que se llama *carga de color* o simplemente color. Esto no tiene nada que ver con el color habitual; es sólo un nombre dado a algo completamente nuevo. El que la palabra «color» esté ya en uso es algo quizás desafortunado, aunque no es la primera vez que una palabra tiene dos significados distintos. La interacción entre dos partículas cargadas eléctricamente se debe al intercambio de fotones virtuales. La interacción (fuerte) entre quarks está causada por el intercambio de una nueva clase de partículas a las que se ha llamado *gluones*. Existen diferencias entre ambas interacciones: las cargas eléctricas aparecen en dos formas, positiva y negativa, o carga y anticarga. Los fotones que se intercambian entre cargas eléctricas son ellos mismos eléctricamente neutros; no transportan ninguna carga y por tanto no emiten más fotones virtuales por derecho propio. Los gluones intercambiados entre quarks son emitidos por un tipo de carga transportada por éstos, que es completamente diferente de la carga eléctrica normal. Se llama «carga de color», pero no tiene que ver en absoluto con los colores que vemos. Mientras que sólo hay una forma de carga eléctrica, junto con su opuesta (o anticarga), existen tres formas diferentes de carga de color, conocidas como «azul», «verde» y «roja». De nuevo hacemos notar que son meros nombres y no tienen nada que ver con los colores usuales. Asociado a cada color existe un anticolor, y hay dos maneras de producir objetos neutros respecto al color. Con la carga eléctrica sólo puede producirse un objeto eléctricamente neutro combinando carga y anticarga (carga positiva y negativa). Hay dos maneras de producir partículas neutras respecto al color: una combinación de color y anticolor (como en los bosones) o una combinación de los tres colores de los quarks (como en los fermiones).

[t] Si las partículas permanecen unidas por la interacción eléctrica, la energía potencial del enlace decrece rápidamente cuando éstas se separan. Si se le da suficiente energía a una partícula, ésta puede acabar siendo completamente libre, como un cohete que ha alcanzado la velocidad de escape, y tiene entonces energía suficiente para liberarse del potencial de la tierra. Sin embargo, cuando una cuerda de gluones ya se ha estirado, para extenderla un poco más hace falta la misma cantidad de energía que la que hacía falta inicialmente. Es como estirar una cuerda elástica; no es más fácil estirarla cuando está más estirada; además, y también como si fuera una cuerda elástica, cuando se estira, puede romperse.

La cuerda de gluones es capaz de absorber más y más energía al separarse los quarks y estirarse aquélla. En su momento, la energía de la cuerda llega a ser mayor que la necesaria para crear un par quark-antiquark. La cuerda se rompe y sus extremos rotos acaban en las cargas de color del nuevo quark y el nuevo antiquark. En lugar del sistema original de tres quarks ahora hay dos sistemas separados, uno de tres quarks y otro de un quark y un antiquark. En vez de producir un quark libre, la energía ha creado una nueva partícula, un bosón.

[u] Aunque los quarks no pueden escapar de las «partículas» en cuyo interior están confinados, sí pueden cambiar de un tipo a otro. Esto se produce por medio de un peculiar proceso conocido como *interacción débil*; se trata de un fenómeno muy «liberal» que hará interactuar en principio a cualquier cosa. La interacción electromagnética afecta sólo a las partículas que tienen carga eléctrica. La interacción fuerte afecta sólo a las partículas que interactúan fuertemente (o hadrones), y no a los leptones. La interacción débil afectará a todas ellas, aunque el efecto es bastante lento y débil; de ahí su nombre. La peculiaridad de la interacción débil es que puede cambiar los quarks. Puede transformar un quark *d (down)* o un quark *s (strange* = «extraño») en

un quark *u (up).* En el proceso cambia la carga eléctrica del quark, y la carga extra la transporta el «bosón W», que es el tipo de partícula intercambiada en la interacción débil. Esta carga puede entonces transmitirse a los leptones creados, un electrón y una partícula eléctricamente neutra, y prácticamente sin masa, conocida como antineutrino. Esto sucede en el proceso de la desintegración nuclear beta, en donde un núcleo radiactivo emite un electrón rápido. Este proceso había sido conocido durante largo tiempo, pero resultaba muy extraño, en el sentido de que no existían electrones en el núcleo para ser emitidos. El electrón se crea en el proceso de desintegración y, como no está ligado, abandona el núcleo inmediatamente.

[v] Ha habido muchos intentos de diseñar un experimento que contradijera las predicciones más extremas de la teoría cuántica, pero hasta la fecha la mecánica cuántica siempre ha salido triunfante. Un ejemplo es el experimento de Aspect para investigar la *paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen* (EPR). Hay varias formas de dicha paradoja, la cual involucra medidas del *espín* de la partícula, esa extraña rotación cuantizada que poseen partículas tales como los electrones y los fotones. La paradoja trata un caso de un sistema sin espín pero que emite dos partículas que lo tienen y que salen en direcciones opuestas. Las restricciones de la teoría cuántica nos dicen que una medida del espín de cualquiera de las partículas arrojará siempre uno de los dos valores: espín-arriba o espín-abajo. Si el sistema original no tiene espín, los espines de ambas partículas deben compensarse; esto es, si una es espín-arriba, la otra *debe* ser espín-abajo, de modo que la suma sea de espín total cero. Si no se lleva a cabo ninguna medida de los espines de las partículas, la mecánica cuántica dice que ambas estarán en una superposición de estados espín-arriba y espín-abajo. Cuando se mide el espín de una de ellas, éste estará definido en ese momento: o arriba o abajo. Pero justo en ese instante, también el espín de la otra partícula queda definido porque ambos han de ser opuestos. Esto será cierto no importa lo alejadas entre sí que estén las partículas. Ésta es en esencia la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen.

[w] Sería razonable explicar la paradoja EPR diciendo que los espines de las partículas estaban de alguna manera predeterminados desde el principio; que, de alguna manera, las partículas *sabían* cuál sería espín-arriba y cuál espín-abajo cuando salieron. En tal caso no importaría cuán lejos hubieran viajado porque llevarían consigo la información. Los límites de la información que sería posible que tuvieran las partículas por anticipado se consideran en el *teorema de Bell*, que analiza lo que sucede si las medidas de espín no se hacen a lo largo de una dirección predeterminada, sino en una selección de ángulos para las dos partículas. El cálculo es bastante sutil, pero el resultado es que, en ciertos casos, la mecánica cuántica predice una correlación entre las medidas sobre las partículas mayor que la que podría conseguirse mediante cualquier información inicial que se enviara con aquéllas sin conocimiento previo de las direcciones a lo largo de las que se medirá el espín. Alain Aspect, en París, ha medido el efecto, y encontró, como es usual, que la mecánica cuántica resulta ser correcta. Parece ser que en ella hay involucrada alguna especie de influencia que «viaja» más rápidamente que la luz. Los resultados de Aspect no contradicen la teoría de la relatividad especial de Einstein, según la cual, ninguna información, ningún mensaje, puede viajar a más velocidad que la de la luz. El efecto considerado en la paradoja EPR no puede usarse para enviar mensajes. Si se pudiera decidir si se mide espín-arriba o espín-abajo en una partícula, entonces el espín opuesto de la otra partícula llevaría información en una especie de código Morse, pero esto no se puede hacer. No se tiene ningún tipo de control del resultado de una medida sobre una superposición de estados cuánticos; el resultado es completamente aleatorio y no se puede forzar con el fin de obtener una señal.